

**ANALISIS TEGANGAN PADA STRUKTUR *MONOCOQUE CHASSIS*  
*PROTOTYPE* MOBIL HEMAT ENERGI BERBAHAN KOMPOSIT  
*CARBON FIBER***

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**MUTIA NUR ARDIANI  
NIM. 145060200111029**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2018**

## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang sepengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelurusan berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak pernah terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 4 Juni 2018

Mahasiswa,



Mutia Nur Ardiani  
NIM. 145060200111029



**LEMBAR PENGESAHAN**

**ANALISIS TEGANGAN PADA STRUKTUR *MONOCOQUE* CHASSIS  
PROTOTYPE MOBIL HEMAT ENERGI BERBAHAN KOMPOSIT  
CARBON FIBER**

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik




**MUTIA NUR ARDIANI**  
**NIM. 145060200111029**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 6 Juli 2018

**DOSEN PEMBIMBING I**

**DOSEN PEMBIMBING II**

  
**Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.**  
**NIP 19720817 200003 1 001**

  
**Nafisah Arina Hidayati, ST., M.Eng**  
**NIP 19831023 201504 2 002**

**Mengetahui,**  
**KETUA PROGRAM STUDI S1**

  
**Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.**  
**NIP 19740930 200012 1 001**



Rasa syukur yang besar kepada Allah

Rasa terima kasih yang banyak untuk

Ayah, Ibu, Teh Zahra, Raisa, dan Kai





**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**PROGRAM SARJANA**



**SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI**

Nomor : 075/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :



**MUTIA NUR ARDIANI**

Dengan Judul Skripsi :

**ANALISIS TEGANGAN PADA STRUKTUR MONOCOQUE CHASSIS PROTOTYPE MOBIL  
HEMAT ENERGI BERBAHAN KOMPOSIT CARBON FIBER**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi  $\leq 20\%$ , dan  
dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **06 JUL 2018**



Ketua Jurusan Teknik Mesin

*[Signature]*

**Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D**

NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

*[Signature]*

**Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.**

NIP. 19740930 200012 1 001

**JUDUL SKRIPSI:**

**ANALISIS TEGANGAN PADA STRUKTUR *MONOCOQUE CHASSIS PROTOTYPE*  
MOBIL HEMAT ENERGI BERBAHAN KOMPOSIT *CARBON FIBER***

Nama Mahasiswa : Mutia Nur Ardiani  
NIM : 145060200111029  
Program Studi : Teknik Mesin  
Minat : Teknik Konstruksi

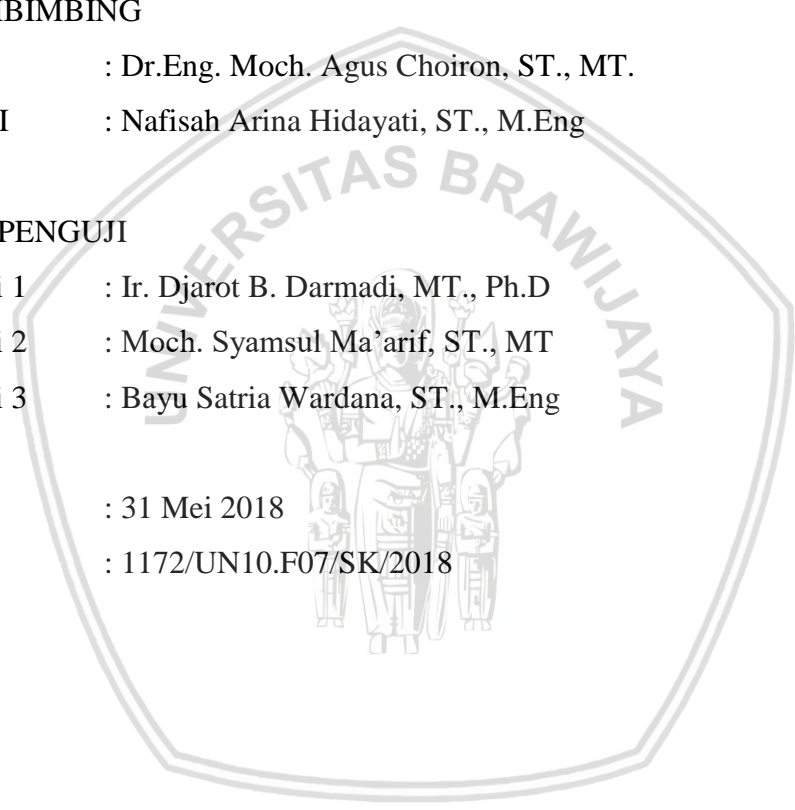
**KOMISI PEMBIMBING**

Pembimbing I : Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.  
Pembimbing II : Nafisah Arina Hidayati, ST., M.Eng

**TIM DOSEN PENGUJI**

Dosen Penguji 1 : Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D  
Dosen Penguji 2 : Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT  
Dosen Penguji 3 : Bayu Satria Wardana, ST., M.Eng

Tanggal Ujian : 31 Mei 2018  
SK Penguji : 1172/UN10.F07/SK/2018



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkat rahmat dan hidayah-Nya serta sholawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Tegangan pada Struktur *Monocoque Chassis Prototype* Mobil Hemat Energi Berbahan Komposit *Carbon Fiber*”. Skripsi ini dibuat untuk memenuhi syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, akan tetapi diharapkan segala usaha yang telah dilakukan dapat menjadi ilmu yang bermanfaat.

Selama proses penulisan dan penyelesaian skripsi ini, penulis banyak memperoleh bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tanpa bantuan dan dukungan yang didapat tidak mungkin skripsi ini dapat terselesaikan. Untuk itu penulis dengan tulus hati ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
2. Bapak Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak Dr.Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M. Eng. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Konstruksi yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan banyak bimbingan, bantuan, serta ilmu dalam penyusunan skripsi ini.
5. Ibu Nafisah Arina Hidayati, ST., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan banyak bimbingan, bantuan, serta ilmu dalam penyusunan skripsi ini.
6. Staf dari Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah melancarkan proses dari skripsi ini.
7. Kedua orang tua serta adik dan kakak dari penulis yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta doa yang tak terhingga sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
8. Saudara Kai yang tanpa kehadiran dan dukungannya tidak mungkin penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

9. Teman-teman M'14 yang namanya tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah memberikan dukungan dan bantuannya selama penyelesaian skripsi ini.
10. Saudari Emilita Christy, Fadhila Qorira, dan Lidya Adityawati yang telah setia menemani penulis dan memberikan dukungan selama masa penyelesaian skripsi ini.
11. Rekan-rekan Laboratorium Mesin Pendingin FT-UB yaitu Reza, Zalbie, Made, Fikri, Hebron, Akbar, Anggi, dan Tejo yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini.
12. Saudara Pangestu, Ilyas, Tri, Isfan, Amir, dan saudari Tary yang telah memberikan kritik dan saran serta ilmu untuk penulis dalam penyelesaian skripsi ini.
13. Saudari Anisa dan teman-teman putri mesin lainnya yang telah memberikan dukungan kepada penulis.
14. Teman-teman dari ENBELLO yaitu Rifda, Mayang, Odith, Neno, Nadia, dan Acit yang telah memberikan banyak semangat kepada penulis.
15. Berbagai pihak yang telah memberikan banyak dukungan yang tidak ternilai.

Akhir kata, semoga amal, bantuan, bimbingan dan doa yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan dari Allah SWT. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik yang bersifat membangun sangat di harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini bermanfaat bagi kita semua. Aamin.

Malang, Mei 2018

Penulis



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>RINGKASAN.....</b>	<b>viii</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>ix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Penelitian Sebelumnya .....	4
2.2 <i>Chassis</i> .....	8
2.2.1 <i>Ladder Frame</i> .....	9
2.2.2 <i>Monocoque</i> .....	9
2.2.3 <i>Space Frame</i> .....	10
2.2.4 <i>Backbone</i> .....	11
2.2.5 Pembebanan pada <i>Chassis</i> .....	12
2.3 Komposit dan Klasifikasinya .....	14
2.3.1 Resin .....	17
2.3.2 <i>Carbon Fiber Epoxy</i> .....	18
2.4 <i>Strength of Materials</i> .....	19
2.5 Analisis Tegangan dan Regangan .....	19
2.6 Metode Elemen Hingga.....	23
2.7 <i>Software</i> berbasis FEA.....	25
2.8 Hipotesis .....	25

<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>26</b>
3.1 Metode Penelitian.....	26
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian .....	26
3.3 Variabel Penelitian .....	26
3.4 Pemodelan Objek Penelitian .....	27
3.5 Meshing.....	31
3.6 Prosedur Penelitian.....	32
3.7 Diagram Alir Penelitian .....	33
 <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	 <b>34</b>
4.1 Verifikasi Data .....	34
4.2 Analisis Tegangan Pada <i>Chassis</i> .....	36
4.2.1 Analisis Tegangan Akibat <i>Vertical Bending</i> .....	37
4.2.2 Analisis Tegangan Akibat <i>Torsional Load</i> .....	42
4.3 Analisis Deformasi Pada <i>Chassis</i> .....	47
4.3.1 Analisis Deformasi Akibat <i>Vertical Bending</i> .....	47
4.3.2 Analisis Deformasi Akibat <i>Torsional Load</i> .....	52
4.4 Pembahasan Tegangan dan Deformasi Pada <i>Chassis</i> .....	56
4.5 Komparasi Seluruh Model .....	57
 <b>BAB V PENUTUP .....</b>	 <b>59</b>
5.1 Kesimpulan .....	59
5.2 Saran.....	60
 <b>DAFTAR PUSTAKA</b>	

## DAFTAR TABEL

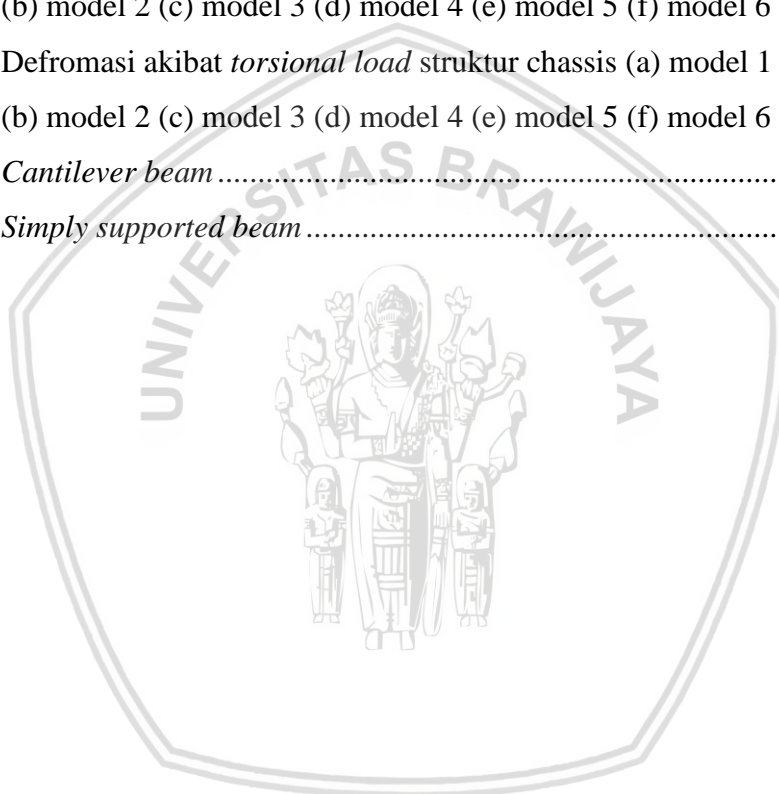
No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Perbandingan Sifat Komposit dan Logam dalam Beberapa Aspek ...	14
Tabel 3.1	Model Susunan Sudut Orientasi.....	27
Tabel 3.2	<i>Material Properties</i> dari <i>Wet Woven Carbon Fiber</i> dengan Resin <i>Epoxy</i> .....	28
Tabel 4.1	Nilai Tegangan Maksimum Seluruh Model <i>Struktur Monocoque</i> <i>Chassis</i> Akibat <i>Vertical Bending</i> .....	40
Tabel 4.2	Nilai Tegangan Maksimum Seluruh Model Struktur <i>Monocoque</i> <i>Chassis</i> Pada Beberapa Titik .....	42
Tabel 4.3	Nilai Tegangan Maksimum Seluruh Model Struktur <i>Monocoque</i> <i>Chassis</i> Akibat <i>Torsional load</i> .....	46
Tabel 4.4	Nilai Tegangan Maksimum Seluruh Model Struktur <i>Monocoque</i> <i>Chassis</i> Pada Beberapa Titik Akibat <i>Torsional load</i> .....	46
Tabel 4.5	Nilai Deformasi Maksimum Seluruh Model Struktur <i>Monocoque</i> <i>Chassis</i> Akibat <i>Vertical Bending</i> .....	51
Tabel 4.6	Nilai Deformasi Maksimum Seluruh Model Struktur <i>Monocoque</i> <i>Chassis</i> Pada Beberapa Titik Akibat <i>Vertical Bending</i> .....	51
Tabel 4.7	Nilai Deformasi Maksimum Seluruh Model Struktur <i>Monocoque</i> <i>Chassis</i> Akibat <i>Torsional Load</i> .....	55
Tabel 4.8	Nilai Deformasi Maksimum Seluruh Model Struktur <i>Monocoque</i> <i>Chassis</i> Pada Beberapa Titik Akibat <i>Torsional Load</i> .....	55
Tabel 4.9	Nilai Deformasi dan Tegangan Maksimum Seluruh Model Struktur <i>Monocoque Chassis</i> .....	57
Tabel 4.10	<i>Inverse reserve factor (IRF)</i> pada Seluruh Model .....	58

## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Struktur <i>space frame</i> pada mobil <i>sport</i> .....	4
Gambar 2.2	Hasil tegangan dan deformasi pada material AISI 1018 .....	5
Gambar 2.3	Hasil tegangan dan deformasi pada material <i>carbon fiber</i> .....	5
Gambar 2.4	Pemodelan <i>chassis monocoque</i> material <i>carbon fiber sandwich</i> .....	6
Gambar 2.5	Jumlah <i>layer</i> dan sudut yang digunakan pada komposit <i>carbon fiber</i>	6
Gambar 2.6	Model sudut orientasi yang digunakan pada komposit <i>carbon fiber</i> .	7
Gambar 2.7	Hasil tegangan pada struktur sayap pesawat.....	8
Gambar 2.8	<i>Ladder frame</i> .....	9
Gambar 2.9	<i>Monocoque</i> .....	10
Gambar 2.10	<i>Space frame</i> .....	11
Gambar 2.11	<i>Backbone chassis</i> .....	11
Gambar 2.12	<i>Torsional load</i> .....	12
Gambar 2.13	<i>Vertical bending</i> .....	13
Gambar 2.14	<i>Lateral bending</i> .....	13
Gambar 2.15	<i>Horizontal lozenge</i> .....	14
Gambar 2.16	Bagian komposit .....	15
Gambar 2.17	Bagan klasifikasi komposit.....	16
Gambar 2.18	<i>Sandwich composite</i> .....	16
Gambar 2.19	Penyusunan lapisan struktur lamina.....	17
Gambar 2.20	Diagram modulus-kekuatan material .....	18
Gambar 2.21	Tegangan yang bekerja pada bidang 3 dimensi .....	20
Gambar 2.22	Lingkaran Mohr untuk tegangan pada kondisi 3 dimensi.....	20
Gambar 2.23	Lingkaran Mohr untuk regangan .....	21
Gambar 2.24	Diagram tegangan-regangan material .....	22
Gambar 2.25	<i>Simple beam</i> .....	22
Gambar 2.26	Macam – macam elemen .....	23
Gambar 3.1	Geometri struktur <i>chassis monocoque</i> .....	28
Gambar 3.2	Contoh pemodelan material untuk model 1 .....	29
Gambar 3.3	Pemodelan pembebanan <i>vertical bending</i> pada struktur <i>chassis monocoque</i> .....	30
Gambar 3.4	Pemodelan pembebanan <i>torsional load</i> pada struktur <i>chassis</i>	



	<i>monocoque</i> .....	31
Gambar 3.5	<i>Meshing</i> pada struktur <i>chassis monocoque</i> .....	32
Gambar 4.1	Matriks ABD model 1 pada ANSYS v.18.2 .....	36
Gambar 4.2	Distribusi tegangan struktur <i>chassis</i> (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3 (d) model 4 (e) model 5 (f) model 6 (MPa) .....	40
Gambar 4.3	Titik-titik yang ditinjau pada struktur <i>chassis</i> .....	41
Gambar 4.4	Distribusi tegangan <i>torsional load</i> struktur <i>chassis</i> (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3 (d) model 4 (e) model 5 (f) model 6 (MPa) .....	45
Gambar 4.5	Defromasi akibat <i>vertical bending</i> struktur <i>chassis</i> (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3 (d) model 4 (e) model 5 (f) model 6 (mm) .	50
Gambar 4.6	Defromasi akibat <i>torsional load</i> struktur <i>chassis</i> (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3 (d) model 4 (e) model 5 (f) model 6 (mm) .	54
Gambar 4.7	<i>Cantilever beam</i> .....	56
Gambar 4.8	<i>Simply supported beam</i> .....	56



## RINGKASAN

**Mutia Nur Ardiani**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2018, *Analisis Tegangan pada Struktur Monocoque Chassis Prototype Mobil Hemat Energi Berbahan Komposit Carbon Fiber*, Dosen Pembimbing: Moch. Agus Choiron, Nafisah Arina Hidayati.

*Chassis* merupakan komponen penting pada kendaraan karena berfungsi sebagai penopang komponen kendaraan lain seperti *engine*. Salah satu jenis *chassis* yang umum digunakan adalah *monocoque chassis*. Untuk berfungsi dengan baik dibutuhkan material *chassis* yang memiliki sifat kaku, kuat, dan ringan seperti komposit *carbon fiber* untuk mengurangi konsumsi bahan bakar. Kekuatan *carbon fiber* dapat dipengaruhi oleh susunan sudut orientasi yang berbeda.

Pada penelitian kali ini analisis tegangan dan deformasi dilakukan dengan menggunakan *software* berbasis *Finite Element Analysis* (FEA). Analisis dilakukan pada 6 buah model dengan kombinasi sudut orientasi yang berbeda setiap modelnya. Sudut orientasi yang berbeda akan menghasilkan tegangan dan deformasi yang berbeda pada *chassis*. Sudut orientasi yang digunakan yaitu  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $90^\circ$ . Beban yang diberikan pada *chassis* yaitu beban *driver* sebesar 900 N dan beban *engine* sebesar 300 N. Dua jenis model pembebanan yang diberikan kepada *chassis* yaitu *vertical bending* dan *torsional load*.

Hasil yang didapat pada penelitian kali ini yaitu tegangan maksimum pada *vertical bending* dengan nilai terkecil terdapat pada model dengan sudut orientasi [45/90/0]<sub>s</sub> sebesar 114.109 MPa. Tegangan maksimum terkecil pada *torsional load* terdapat pada model dengan sudut orientasi [0<sub>2</sub>/45<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>] dan [90/0/45]<sub>s</sub> sebesar 82.257 MPa. Nilai deformasi maksimum terendah yang terjadi pada pembebanan *vertical bending* yaitu sebesar 8.080 mm pada model kedua dan kelima dengan kode sudut orientasi [0<sub>2</sub>/45<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>] dan [90/0/45]<sub>s</sub> secara berturut-turut. Nilai deformasi maksimum terendah yang terjadi pada pengujian *torsional load* yaitu sebesar 66.755 mm pada model pertama dengan kode sudut orientasi [0/45/90]<sub>s</sub>.

Kata kunci: analisis tegangan, *carbon fiber*, *chassis*, sudut orientasi

## SUMMARY

**Mutia Nur Ardiani**, *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, May 2018, Stress Analysis of an Eco-Car Carbon Fiber Monocoque Chassis, Academic Supervisor : Moch. Agus Choiron, Nafisah Arina Hidayati.*

Chassis is an important part of vehicle because its function to support another part such as engine. Monocoque chassis is a type of chassis which body and frame are integrated together. For chassis to do its function, the material needs to be stiff, has a good strength, and lightweight such as carbon fiber. The strength of carbon fiber can be influenced by its ply orientation.

In this study, stress and deformation analysis are performed using Finite Element Analysis (FEA) software. Analyses are performed on 6 different models with different combination of ply orientation in each model. Different combination of ply orientation will influence the result of stress and deformation of chassis. Angles of ply orientation used in this study are  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , and  $90^\circ$ . Loads given on monocoque chassis are 900 N driver and 300 N engine load. Two types of loading are performed on chassis which are vertical bending and torsional load.

The result of this study shows that the smallest maximum stress in vertical bending is 114.109 MPa on a model with  $[45/90/0]_s$  orientation. The smallest maximum stress in torsional load is 82.257 MPa on models with  $[0_2/45_2/90_2]$  and  $[90/0/45]_s$  orientation. The smallest deformation in vertical bending is 8.080 mm on a model with  $[0_2/45_2/90_2]$  and  $[90/0/45]_s$  orientation. The smallest deformation in torsional load is 66.755 mm on a model with  $[0/45/90]_s$  orientation.

*Keywords: stress analysis, carbon fiber, chassis, ply orientation*

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada mobil, komponen dengan kontribusi terbesar pada berat adalah *chassis*. *Chassis* berfungsi sebagai penopang komponen pada mobil seperti sistem transmisi, bodi kendaraan, *engine*, dan komponen yang lain. *Chassis* juga berfungsi untuk menyerap beban dampak yang dihasilkan akibat benturan dari luar (Sutantra, 2010). Terdapat beberapa tipe *chassis* yang digunakan pada mobil antara lain *monocoque* dan *ladder frame*. *Monocoque chassis* adalah salah satu jenis *chassis* yang umum digunakan dimana bodi dan rangka mobil tergabung menjadi satu struktur sedangkan *ladder frame* merupakan dua buah batang penopang yang melintang sepanjang kendaraan (Eurenius et al., 2013). Untuk mengurangi berat total dari suatu kendaraan dibutuhkan material yang kuat untuk membuat *chassis*.

Beberapa penelitian mengenai material *chassis* terus dikembangkan untuk menghasilkan *chassis* yang kuat. Salah satu material yang banyak digunakan adalah komposit karena memiliki kekakuan yang baik, kuat, tetapi ringan. Selain itu komposit juga dapat mereduksi getaran dan *noise* serta menyerap energi lebih baik (Njuguna, 2016). Komposit seperti *carbon fiber* banyak digunakan jika dibutuhkan struktur dengan kekakuan yang tinggi dan ringan (Campbell, 2010). *Carbon fiber* memiliki dua jenis yaitu *unidirectional carbon fiber* dan *woven carbon fiber*. Pada *unidirectional carbon fiber* arah orientasi dari *fiber* searah, sedangkan pada *woven* arah orientasi dari *fiber* saling tegak lurus (Lii, 2009). Pada komposit *woven carbon fiber* memiliki kekuatan lebih baik dalam berbagai arah dibandingkan dengan *unidirectional carbon fiber* (Campbell, 2010). Komposit *carbon fiber* diaplikasikan pada struktur seperti pesawat dan kendaraan.

Analisis kekuatan struktur pada *space frame chassis* dengan material *carbon fiber* dan baja telah dilakukan. Deformasi yang dihasilkan pada struktur berbahan komposit *carbon fiber* terbukti lebih kecil dibandingkan dengan struktur dengan material baja (More et al., 2017). Pengaturan sudut orientasi dan jumlah *layer* juga mempengaruhi besar tegangan dan deformasi pada *monocoque chassis* berbahan *carbon fiber* (Wu et al., 2014). Analisis mengenai pengaruh sudut orientasi pada *layer* untuk komposit *carbon fiber* juga telah dilakukan pada struktur sayap pesawat. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa



setiap susunan sudut orientasi yang berbeda pada setiap model *laminate* komposit *carbon fiber* akan menghasilkan tegangan dan deformasi yang berbeda (Mathai et al., 2014). Berdasarkan dari penelitian sebelumnya dapat diketahui bahwa material dan susunan sudut orientasi dapat mempengaruhi kekuatan suatu struktur komposit. Oleh karena itu untuk aplikasi *monocoque chassis* maka diperlukan analisis lebih lanjut mengenai pengaruh sudut orientasi dengan variasi yang beragam terhadap kekuatan *chassis* berbahan *carbon fiber*. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui tegangan dan deformasi yang terjadi pada *monocoque chassis* agar menghasilkan *chassis* yang ringan dan kuat. Selain itu pemilihan/penentuan sudut orientasi dari *layer* komposit *carbon fiber* bertujuan agar material komposit mudah untuk di produksi.

Berdasarkan dari uraian diatas perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai analisis tegangan pada struktur *monocoque chassis* dengan beberapa variasi susunan sudut orientasi. Analisis dapat dilakukan dengan membuat pemodelan struktur *chassis* menggunakan *software* berbasis *Finite Element Analysis* (FEA), yaitu ANSYS v.18.2. Dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk pengembangan perencanaan mobil hemat energi seperti yang terdapat pada kompetisi *Shell Eco-marathon* (SEM). Selain itu diharapkan dapat dihasilkan *chassis* yang kuat dan ringan yang akan mengurangi besar berat total. Jika berat total mobil berkurang maka konsumsi energi bahan bakar akan berkurang karena berat total berbanding lurus dengan energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan kendaraan (Folkson, 2014).

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian kali ini adalah bagaimana pengaruh dari variasi sudut orientasi *layer* pada komposit *carbon fiber* terhadap tegangan dan deformasi yang terjadi pada struktur *monocoque chassis* dari *prototype* mobil hemat energi.

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dibuat agar penelitian menjadi lebih terfokus. Pada penelitian kali ini batasan masalah yang ditetapkan antara lain:

1. Model yang digunakan adalah mobil *prototype* mobil hemat energi.
2. Material yang digunakan adalah *Wet Carbon Fiber Woven* dengan resin *Epoxy*.
3. Penelitian menggunakan *software* berbasis Metode Elemen Hingga.
4. Penelitian terfokus terhadap tegangan dan deformasi yang terjadi pada struktur akibat *vertical bending* dan *longitudinal torsion*.

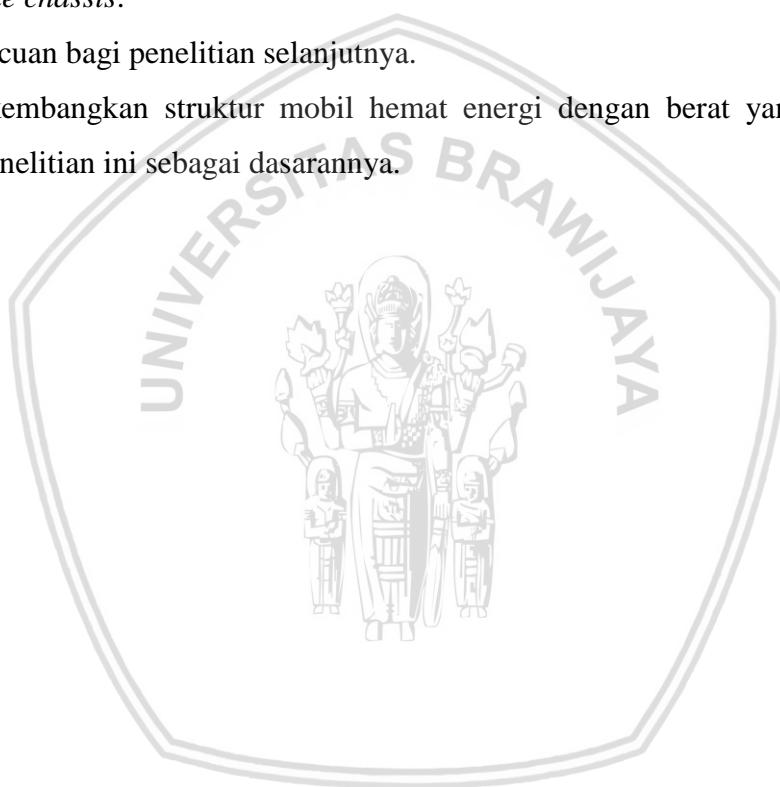
#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan tercapai pada penelitian kali ini adalah mengetahui pengaruh dari sudut orientasi *layer* pada komposit *carbon fiber* terhadap tegangan dan deformasi yang terjadi pada struktur *monocoque chassis* dari *prototype* mobil hemat energi.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan penulis pada penelitian kali ini, diantaranya:

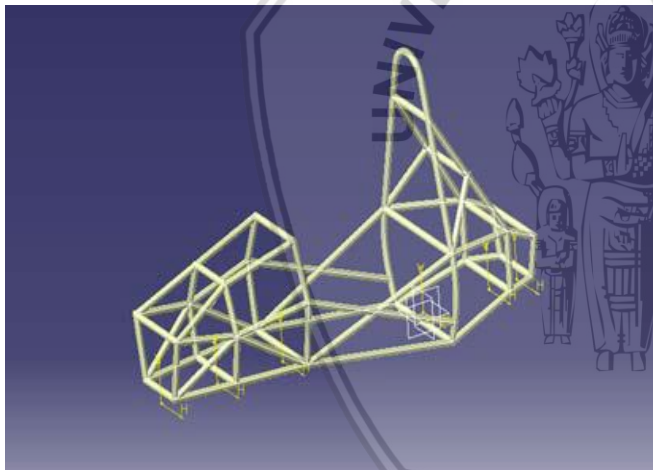
1. Memberikan pengetahuan lebih lanjut mengenai tegangan dan deformasi pada struktur *monocoque chassis*.
2. Menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya.
3. Dapat dikembangkan struktur mobil hemat energi dengan berat yang lebih ringan dengan penelitian ini sebagai dasarnya.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

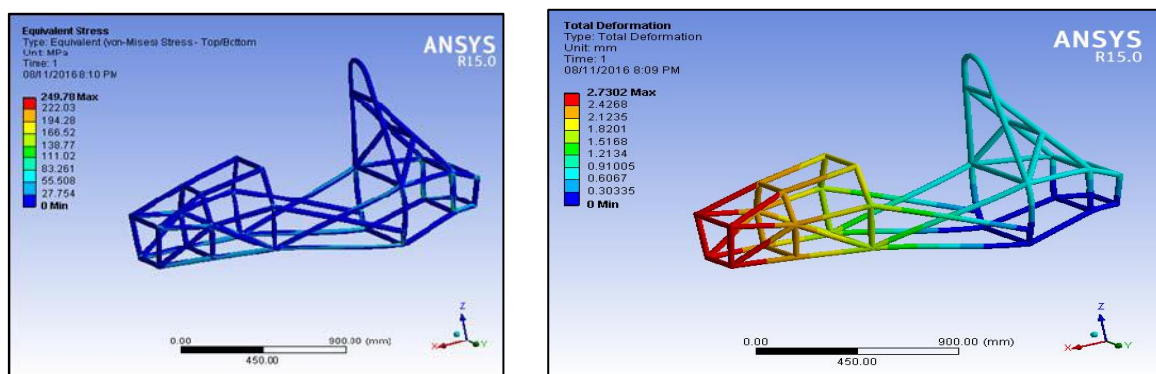
More et al. (2017) menganalisis kekuatan pada struktur *chassis* jenis *space frame* dengan dua jenis material yang berbeda. Struktur ini dirancang untuk digunakan pada mobil *sport*. Pemodelan struktur dilakukan dengan menggunakan *software* CAD lalu dipindahkan ke *software* berbasis MEH untuk dianalisis. More menggunakan dua material, yaitu baja AISI 1018 dan *carbon fiber*. Massa dari kendaraan sebesar 250 kg dengan waktu impact 0.2 detik. Dengan mengkalikan massa dan perubahan momentum dibagi dengan waktu impact, maka didapat gaya impact depan sebesar 34712.5 N. Pemodelan benda dapat dilihat pada Gambar 2.1.



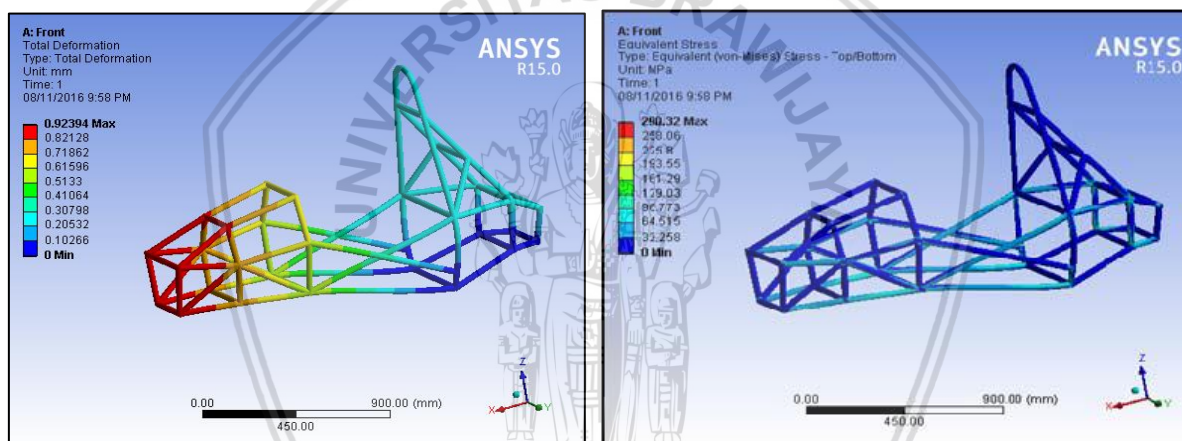
Gambar 2.1 Struktur *space frame* pada mobil *sport*  
Sumber: More (2017,p.1413)

Pada struktur dengan material baja AISI 1018 diperoleh deformasi sebesar 2.7302 mm dan tegangan maksimum dengan teori Von-Mises sebesar 249.78 MPa. Distribusi tegangan dan deformasi struktur bisa dilihat pada Gambar 2.2. Pada struktur dengan material *carbon fiber*, tegangan maksimum yang terjadi adalah 290.32 MPa dengan deformasi sebesar 0.92393 mm. Hasil dapat dilihat pada Gambar 2.3. Dari kedua hasil dapat dilihat bahwa

tegangan dan deformasi yang terjadi pada struktur dengan material *carbon fiber* lebih kecil dibandingkan struktur baja AISI 1018.



Gambar 2.2 Hasil tegangan dan deformasi pada material AISI 1018  
Sumber: More (2017,p.1415)

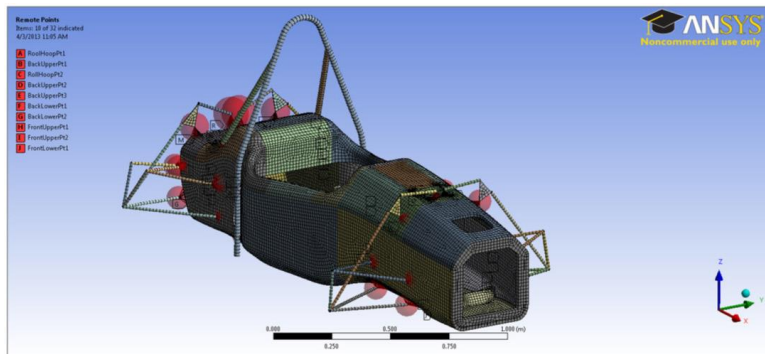


Gambar 2.3 Hasil tegangan dan deformasi pada material *carbon fiber*  
Sumber: More (2017,p.1417)

Penelitian yang lain, Wu et al. (2014) melakukan simulasi pada struktur *monocoque chassis* dengan material *carbon fiber* dengan tipe struktur komposit *sandwich*. Tujuan dari penelitian yang dilakukan Wu et al. (2014) adalah untuk menemukan struktur *chassis* dengan kekakuan tertentu dengan berat yang minimum. Objek yang dianalisis merupakan contoh *chassis* untuk Formula SAE atau mobil balap pada umumnya. Simulasi masih menggunakan *software* berbasis MEH. Material yang digunakan adalah *carbon fiber* T300 Weave. Struktur komposit *sandwich* memiliki *core* atau inti. *Core* pada struktur *sandwich* komposit *carbon fiber* yang digunakan yaitu aluminum 5250. Pemodelan struktur dapat dilihat pada Gambar 2.4. Penelitian ini menggunakan beberapa penggunaan sudut



orientasi, tebal *core* yang berbeda, dan jumlah lapisan *carbon fiber* yang berbeda pada setiap simulasinya.



Gambar 2.4 Pemodelan *chassis monocoque* material *carbon fiber sandwich*  
Sumber: Wu et al. (2014,p.858)

Hasil yang didapat yaitu sudut orientasi dan jumlah lapisan pada penyusunan komposit *carbon fiber* mempengaruhi kekakuan pada struktur *chassis*. Susunan *layer* komposit yang dianalisis oleh Wu et al. (2014) dapat dilihat pada gambar 2.5.

Side Impact		Front Hoop Bracing		Front Bulkhead Suport	
Original	Optimized	Original	Optimized	Original	Optimized
0	0	0	0	0	0
45	0	45	0	45	0
0	0	45	45	0	0
45	45	0	45	45	45
0	45	19.05 mm Core	25.4 mm Core	0	45
45	45			45	45
0	45			0	45
19.05 mm Core	25.4 mm Core			19.05 mm Core	25.4 mm Core

Gambar 2.5 Jumlah *layer* dan sudut yang digunakan pada komposit *carbon fiber*  
Sumber: Wu et al. (2014,p.858)

Pada Gambar 2.5 menjelaskan susunan *layer* pada komposit material untuk bagian-bagian pada *chassis*. Dilakukan perbandingan dari susunan yang sudah ada dengan susunan yang dioptimasi. Untuk baris pertama menunjukkan *layer* pertama dengan sudutnya yaitu 0° dan seterusnya. Penelitian tersebut menghasilkan bahwa dengan susunan komposit yang sudah dioptimasi menghasilkan peningkatan kekakuan torsional sebesar 7.7% dari nilai awal.

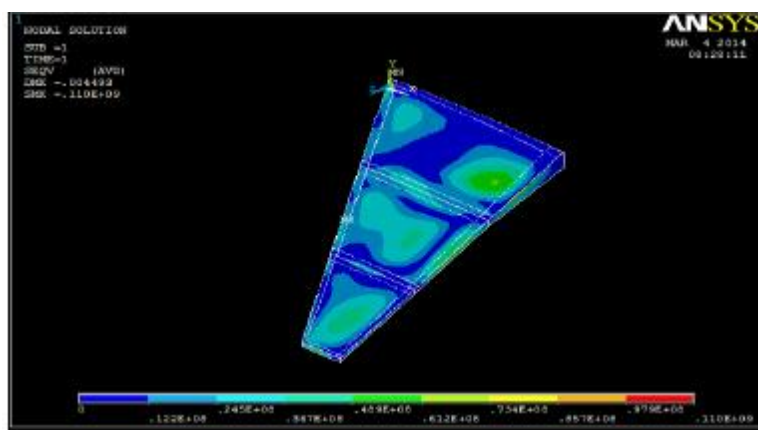
Selanjutnya, Mathai et al (2014) melakukan analisis dari pengaruh sudut orientasi *carbon fiber* yang digunakan pada struktur sayap pesawat. Tujuan penelitian yang dilakukan tersebut adalah untuk melihat perbedaan deformasi dan tegangan yang terjadi pada struktur sayap pesawat dengan sudut orientasi *laminate* yang berbeda-beda. Analisis tersebut menggunakan *software* berbasis Metode Elemen Hingga. Mathai membuat 7 model dengan jumlah ply sebanyak 20 dan perbedaan 15° pada setiap *laminate* komposit *carbon fiber*. Ketujuh model yang digunakan Mathai dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Ply Layout Sequence
$[0_2/90_2/+0/-0/90_2/0_2]_{ns}$
$[0_2/90_2/+15/-15/90_2/0_2]_{ns}$
$[0_2/90_2/+30/-30/90_2/0_2]_{ns}$
$[0_2/90_2/+45/-45/90_2/0_2]_{ns}$
$[0_2/90_2/+60/-60/90_2/0_2]_{ns}$
$[0_2/90_2/+75/-75/90_2/0_2]_{ns}$
$[0_2/90_2/+90/-90/90_2/0_2]_{ns}$

Gambar 2.6 Model sudut orientasi yang digunakan pada komposit *carbon fiber*  
 Sumber: Mathai et al. (2014,p.54)

Pada Gambar 2.6 terdapat penulisan sudut orientasi dari komposit *laminate carbon fiber*. Penulisan kode tersebut setiap *layer* dipisahkan dengan tanda baca garis miring. Tanda kurung merupakan batas pembuka dan penutup dari struktur. Huruf yang di *subscript* merupakan keterangan dari struktur *laminate carbon fiber* tersebut. Seperti pada Gambar 2.6 bahwa huruf “ns” yang di *subscript* merupakan *non-symmetrical* yang artinya bahwa struktur *laminat carbon fiber* tidak simetris. Jika sebelum tanda kurung terdapat angka yang di *subscript* maka hal tersebut menunjukkan pengulangan sudut untuk *layer* setelahnya.

Dari penelitian tersebut didapat bahwa setiap perbedaan susunan sudut orientasi akan menghasilkan tegangan dan deformasi yang berbeda. Dari penelitian ini dapat dilihat model susunan sudut orientasi yang akan menghasilkan tegangan dan deformasi yang terkecil pada struktur sayap pesawat. Hasil dari penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Hasil tegangan pada struktur sayap pesawat  
Sumber: Mathai et al. (2014,p.54)

Dari seluruh penelitian diatas dapat dilihat bahwa sudut orientasi yang berbeda akan berpengaruh terhadap tegangan dan deformasi yang terjadi pada suatu struktur *chassis*. Untuk menghasilkan *chassis* yang memiliki kekuatan yang lebih baik maka diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai kombinasi sudut-sudut orientasi terbaik pada *carbon fiber*.

## 2.2 Chassis

*Chassis* adalah rangka pada kendaraan, tempat untuk *body* menempel, yang digunakan untuk menopang berat dan beban impact pada saat terjadi benturan untuk melindungi penumpang (Sutantra, 2010). *Chassis* juga berfungsi untuk menjaga kendaraan agar tetap kaku dan tidak terdeformasi apabila beban diberikan. *Chassis* harus dapat menahan semua beban dari setiap komponen pada mobil dan juga menopang sistem suspensi dengan baik pada saat kendaraan bergerak. *Chassis* yang berfungsi dengan baik, memiliki nilai aman yang tinggi sehingga tidak membahayakan penumpang yang ada di dalam kendaraan. Material yang digunakan pada *chassis* dipilih berdasarkan dengan kesesuaian tujuan penggunaan, tipe, dan proses produksi yang dilakukan. Untuk dapat berfungsi dengan baik, dibutuhkan material yang kaku, kuat dan ringan pada *chassis*. Material yang ringan dibutuhkan agar kendaraan memerlukan bahan bakar yang minimum untuk beroperasi. Banyak terdapat tipe *chassis* yang digunakan pada kendaraan, diantaranya adalah *ladder*, *monocoque*, *space frame*, *backbone*, dan *tub*.

### 2.2.1 Ladder Frame

*Chassis* jenis *ladder frame* berbentuk dua batang paralel dengan panjang yang sama dengan panjang kendaraan, yang berfungsi untuk menopang beban yang telah ditentukan (Wakeham, 2009, p.23). *Chassis* jenis ini juga bisa disebut dengan *twin-tube*. *Ladder frame* terdiri dari dua batang yang memiliki penampang berbentuk C dan dihubungkan dengan komponen penghubung. Maka dari itu jenis *chassis* ini disebut dengan *ladder frame* karena bentuknya yang menyerupai tangga. Gambar 2.8 merupakan contoh dari *ladder frame*. Pada umumnya, *chassis* jenis ini dibuat dengan material baja ringan. *Chassis* ini dapat dibuat dengan proses pengelasan maupun penyambungan dengan paku keling. *Ladder frame* banyak digunakan pada kendaraan jenis *truck* dan *sport utility vehicle* (SUV). *Chassis* jenis ini memiliki ketahanan yang baik terhadap beban *bending* dan memiliki ketahanan yang buruk terhadap gaya torsi.



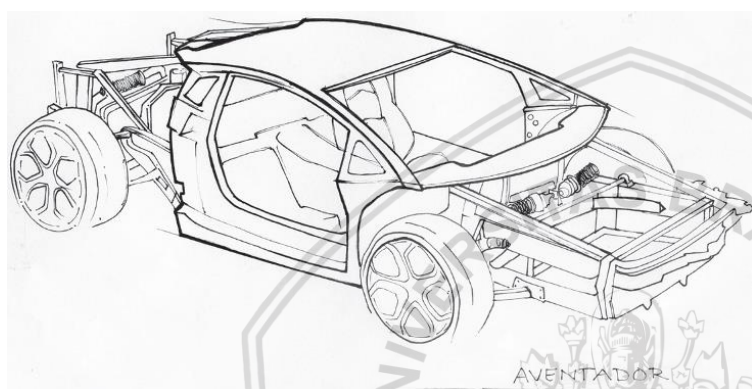
Gambar 2.8 Ladder frame  
Sumber: Konjeti (2016,p.448)

### 2.2.2 Monocoque

Tipe *monocoque chassis* merupakan struktur *chassis* integral dengan bentuk sesuai bentuk kendaraan yang didesain (Sutantra, 2010). *Chassis* ini merupakan yang paling umum digunakan selain tipe *ladder frame*. *Monocoque chassis* merupakan satu struktur utuh dimana rangka dan badan kendaraan menjadi satu. Struktur jenis ini dapat dibuat dengan proses pengelasan semua rangkanya, pengecoran, pembentukan, atau gabungan dari proses-proses tersebut. Pada tipe ini, seluruh unit didesain sebagai penanggung beban



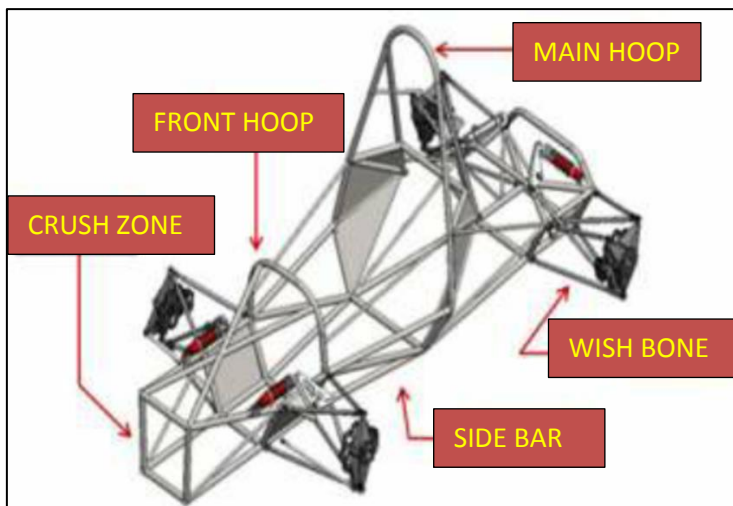
yang ada pada kendaraan. Material yang digunakan pada *chassis* jenis ini pada umumnya merupakan baja. Paduan antara baja dan aluminium juga tidak jarang digunakan untuk mendapatkan berat yang lebih ringan. Penggunaan material lain juga dapat digunakan. Material yang tepat akan menghasilkan berat yang lebih ringan dan memiliki kekakuan yang tinggi jika digunakan pada *chassis* ini. *Monocoque* mempunyai banyak kelebihan dibandingkan jenis *chassis* lainnya. Diantaranya adalah pengurangan berat total kendaraan akibat rangka dan *body* menjadi satu dan pengurangan getaran yang ada pada struktur kendaraan. Gambar 2.9 merupakan *chassis* tipe *monocoque*.



Gambar 2.9 Monocoque  
Sumber: Folkson (2014,p.452)

### 2.2.3 Space Frame

*Space frame* merupakan struktur *truss* yang berbentuk segitiga yang dimana beban terdistribusi ke arah aksial secara merata sehingga tidak ada bagian dari rangka yang mempunyai gaya *bending* yang lebih besar (Wakeham, 2009, p.23). Penampang dari jenis *chassis* ini dapat dilihat pada Gambar 2.10. *Chassis* ini tidak dipakai pada kendaraan berpenumpang sehari – hari. *Space frame chassis* dibuat dengan menggabungkan batang baja sehingga membentuk suatu rangka. Karena bentuknya yang rumit, *chassis* ini memiliki kekuatan yang tinggi tetapi memakan biaya, waktu, dan proses yang sulit dalam pembuatannya. Maka dari itu pada umumnya *chassis* ini dipakai khusus untuk jenis mobil balap dan mobil *sport* dengan performa tinggi saja.



Gambar 2.10 Space frame

Sumber: Marzuki (2015)

#### 2.2.4 Backbone

Prinsip utama dari *backbone chassis* adalah struktur terdiri dari bagian depan dan belakang yang menghubungkan tabung yang melintang sepanjang kendaraan (Wakeham, 2009, p.41). Material yang digunakan untuk tipe *chassis* ini biasanya adalah *fiber glass*. Komponen pusat yang kaku adalah tempat dimana roda, rantai energi dan mesin ditempatkan pada *chassis* jenis ini. Penggunaan *chassis* jenis ini hanya pada mobil berkelas seperti Lotus Elan. Gambar 2.11 adalah penampang dari *backbone chassis*. Tipe *chassis* ini memiliki efisiensi ruang yang baik tetapi tidak melindungi apabila terdapat benturan dari samping.



Gambar 2.11 Backbone chassis

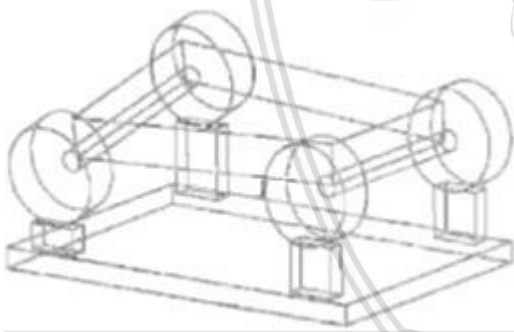
Sumber: Automobile Components (2010)

### 2.2.5 Pembebanan pada *Chassis*

Seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya bahwa *chassis* merupakan komponen yang penting pada kendaraan. Dalam pembuatannya, *chassis* perlu beberapa pertimbangan agar menghasilkan suatu struktur yang aman bagi pengendara. Salah satu faktornya adalah pembebanan pada *chassis*. Sebelum *chassis* digunakan oleh pengendara, perlu dilakukan beberapa analisis pembebanan yang ada pada *chassis* untuk memastikan apakah *chassis* benar – benar aman. *Chassis* dapat dikatakan aman ketika deformasi yang terjadi pada *chassis* akibat beban tidak besar. Beberapa pembebanan yang menyebabkan terjadinya deformasi pada *chassis* diantaranya adalah :

#### a. *Torsional Load*

Pembebanan yang terjadi pada ujung-ujung atau sisi kendaraan akan menyebabkan beban torsi (Wu et al., 2014). Pada mobil FSAE, Beban torsi yang terjadi pada *chassis* menjadi faktor utama dalam menentukan kekakuan torsional *chassis*. *Chassis* dengan nilai kekakuan torsional tinggi akan memiliki resistansi deformasi yang baik akibat pembebanan *torsional load*. Gambar 2.12 merupakan ilustrasi dari pembebanan ini.

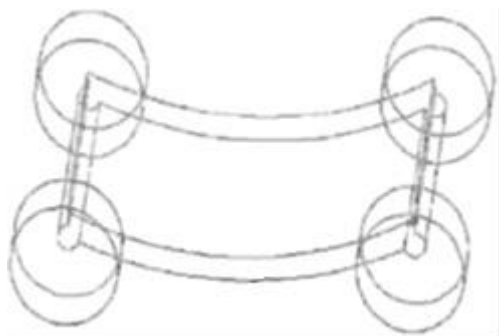


Gambar 2.12 *Torsional Load*

Sumber: Wu et al. (2014,p. 839)

#### b. *Vertical Bending*

*Vertical bending* pada *chassis* disebabkan oleh berat dari mesin dan komponen lainnya, pengendara dan penumpang, yang ditopang oleh *chassis*. Percepatan vertikal dapat menambah nilai dari jenis pembebanan beban ini. Gambar 2.13 merupakan *chassis* ketika diberikan beban seperti beban *driver* atau *engine* yang menyebabkan *chassis* melendut.



Gambar 2.13 Vertical bending

Sumber: Wu et al. (2014,p. 839)

c. *Lateral Bending*

*Lateral bending* terjadi ketika gaya yang terjadi sepanjang sisi dari kendaraan dan akan ditahan oleh roda. Beban ini disebabkan oleh gaya yang dihasilkan ketika kendaraan melakukan *cornering* (Eurenus et al, 2017, p.13). Gambar 2.14 menunjukkan *chassis* akibat dari pembebanan ini.

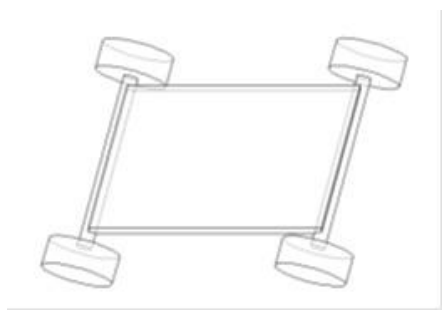


Gambar 2.14 Lateral bending

Sumber: Eurenus et al. (2013,p.13)

d. *Horizontal Lozengeing*

*Horizontal lozengeing* terjadi akibat adanya gaya yang berbeda arah atau tidak seimbang terjadi pada roda kendaraan dari dua sisi berbeda. Hal tersebut akan menyebabkan *chassis* terdeformasi menjadi bentuk seperti pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Horizontal lozenge  
Sumber: Eurenus et al. (2017,p.242)

2.3 Komposit dan Klasifikasinya

Teknologi pada masa ini membutuhkan material yang sifatnya tidak lagi bisa dipenuhi oleh material konvensional seperti logam paduan, keramik, dan sebagainya. Maka dari itu diperlukan material seperti komposit. Komposit adalah material yang terdiri dari gabungan beberapa material. Suatu material dapat dikatakan sebagai komposit apabila proses penggabungan material tersebut berada pada skala makroskopis (Gibson, 2011, p.1). Komposit menjadi material yang sering digunakan pada masa ini karena mudah untuk menyesuaikan sifat-sifat material yang ada dengan yang dibutuhkan. Dapat dilihat pada Tabel 1.1 bahwa secara umum komposit memiliki sifat lebih baik dibandingkan dengan logam. Munculnya ide komposit secara tidak langsung berawal ketika orang zaman dahulu memakai kayu sebagai peralatan sehari-hari. Kayu memiliki serat-serat yang mana bersifat kuat dan kaku sehingga mencegah struktur untuk rusak. Dari hal tersebut mulai diteliti jika banyak material dalam bentuk serat memiliki kekuatan dan kekakuan yang lebih besar dibandingkan bentuk yang besar (Gibson, 2011, p.2).

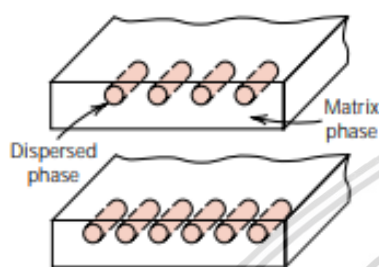
Tabel 2.1  
Perbandingan Sifat Komposit dan Logam dalam Beberapa Aspek

<i>Condition</i>	<i>Comparative behavior relative to metals</i>
<i>Load-strain relationship</i>	<i>More linear strain to failure</i>
<i>Notch sensitivity</i>	
<i>Static</i>	<i>Greater sensitivity</i>
<i>Fatigue</i>	<i>Less sensitivity</i>
<i>Transverse properties</i>	<i>Weaker</i>
<i>Mechanical property variability</i>	<i>Higher</i>
<i>Fatigue strength</i>	<i>Higher</i>
<i>Sensitivity to hydrothermal environment</i>	<i>Greater</i>
<i>Sensitivity to corrosion</i>	<i>Much less</i>
<i>Damage growth mechanism</i>	<i>In-plane delamination instead of through thickness cracks</i>

Sumber: Campbell (2010, p.11)



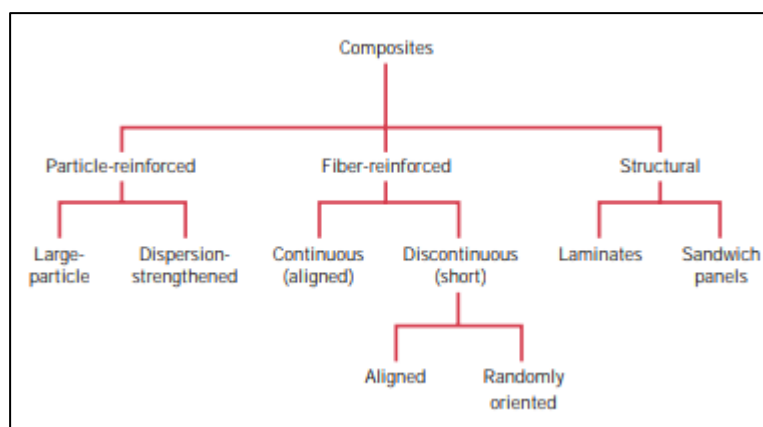
Konsep dasar dari material komposit adalah penggabungan dua atau lebih material dengan tujuan untuk membentuk material baru dengan sifat – sifat terbaik yang dimiliki material penyusunnya (Callister, 2009, p.628). Umumnya komposit terdiri dari dua bagian. Bagian pertama, atau yang sering disebut dengan *matrix*, adalah bagian yang kontinu dan mengikat bagian lainnya dan menentukan kualitas dari permukaan komposit. Bagian lainnya atau *dispersed phase* adalah bagian komposit yang membentuk geometri dari komposit. Gambar 2.16 merupakan gambar dari dua bagian dari sebuah material komposit.



Gambar 2.16 Bagian komposit  
Sumber: Callister (2009,p. 629)

Komposit dapat diklasifikasikan dalam 3 kelompok (Callister, 2009, p.628) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17. Kelompok yang pertama yaitu komposit dengan penguat partikel (*particle-reinforced*). Komposit jenis ini dapat dibagi kembali menjadi partikel besar dan penguat dispersi. Komposit *particle-reinforced* mengutamakan proses penguatan pada skala molekul. Contoh paling umum dari komposit ini adalah beton.

Untuk komposit serat (*fiber-reinforced*) mempunyai geometri penguat berbentuk serat. Komposit serat memiliki perbandingan panjang terhadap diameter yang tinggi. Komposit serat yang biasa digunakan adalah karbon, *glass*, dan *aramid fiber*. Komposit ini digunakan untuk mendapatkan kekuatan dan kekakuan yang lebih besar yang tidak dapat dipenuhi oleh material lainnya. *Continuous* dan *discontinuous aligned fiber-reinforced* merupakan jenis dari komposit serat yang dimana sifatnya *anisotropic*, atau bergantung kepada arah yang diukur. Untuk *randomly oriented discontinuous* komposit bersifat *isotropic*, yaitu sifat yang dimiliki sama dalam segala arah.

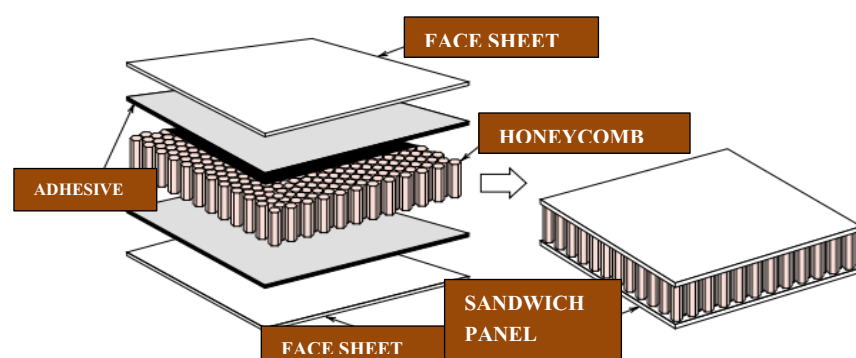


Gambar 2.17 Bagan klasifikasi komposit  
Sumber: Callister (2009,p. 629)

Beberapa jenis *fiber* dari komposit yaitu *carbon*, *aramid*, *E-glass*, *boron*, *silicon carbide*, dan lain-lain. Pemilihan dari *fiber* tergantung dari kebutuhan dan struktur yang dibuat. Berdasarkan strukturnya komposit dibagi menjadi dua yaitu *laminates* dan *sandwich panels* seperti pada Gambar 2.17. Komposit dalam golongan ini dipengaruhi oleh sifat material penyusunnya, geometri, dan berbagai elemen struktur lainnya.

#### A. *Sandwich Panels Structure*

*Sandwich panels* adalah struktur yang terdiri dari dua lembaran pada bagian luar dan dipisahkan oleh satu lapisan material, atau bisa disebut dengan inti, yang mempunyai kekakuan dan kekuatan yang lebih rendah (Callister, 2001, p.196). Fungsi dari inti pada struktur ini adalah menahan deformasi tegak lurus arah bidang permukaan. *Core* juga memiliki nilai kekakuan geser terhadap bidang yang tegak lurus permukaan. Material *core* bermacam-macam seperti karet sintesis, polimer, hingga kayu balsa. *Core* paling umum berbentuk struktur *honeycomb* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18.

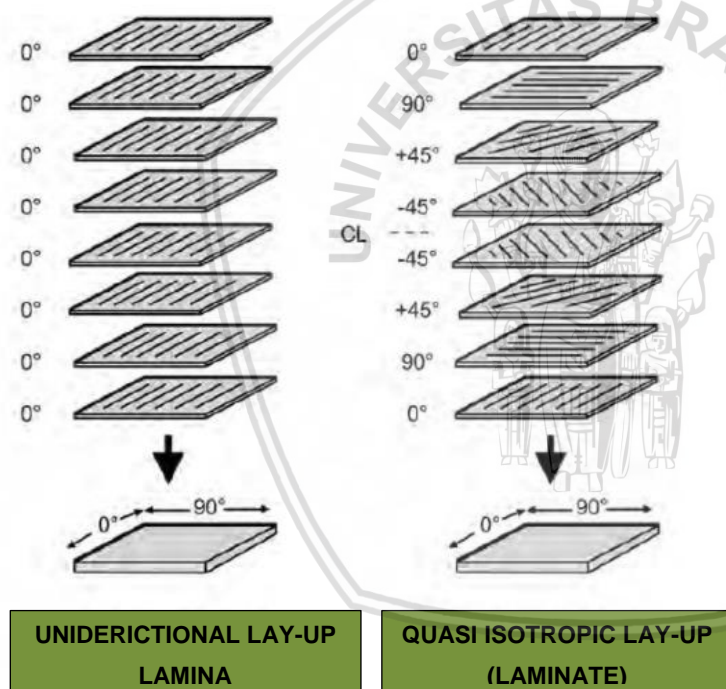


Gambar 2.18 Sandwich composite  
Sumber: Callister (2009,p. 662)

## B. Laminates Structure

Struktur laminar komposit tersusun dari beberapa lapisan yang mempunyai kekuatan tinggi (Callister, 2009, p.660). Komposit ini terbentuk dari susunan beberapa material yang berbeda yang disatukan dengan resin dengan tujuan menambah kekuatan dan sifat lainnya. Material penyusun *laminates* pada umumnya adalah serat, kaca, kayu, dan kertas.

Komposit lamina mempunyai kekuatan yang dipengaruhi oleh arah dari bidang 2 dimensi. Komposit lamina akan memiliki kekuatan tinggi pada arah yang sama dengan arah orientasinya dan rendah di lain arah orientasi. Untuk itu arah orientasi merupakan faktor yang penting pada struktur lamina. Gambar 2.19 menunjukkan contoh penyusunan lapisan dari struktur lamina.



Gambar 2.19 Penyusunan lapisan struktur lamina

Sumber: Campbell (2010, p. 164)

### 2.3.1 Resin

Resin adalah matriks dari material komposit yang menggunakan biasanya menggunakan material polimer (Jose, 2012). Polimer dibuat dari pengulangan unit monomer, yang dimana jumlah pengulangan tersebut dapat disebut sebagai derajat polimerisasi. Resin memiliki fungsi diantaranya adalah mempertahankan orientasi serat, melindungi serat dari lingkungan yang dapat merusak struktur komposit seperti

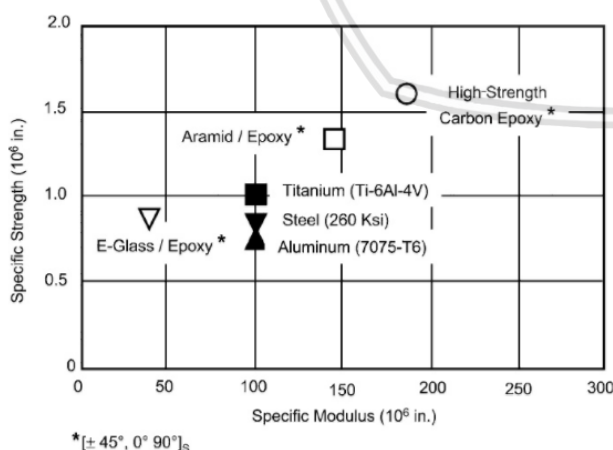
kelembapan dan temperatur tinggi. Jenis resin yang paling umum adalah *thermosetting* dan *thermoplastic*.

*Thermosetting* ketika sudah melalui proses *curing* tidak dapat kembali ke bentuk awalnya. Resin jenis ini memiliki kelebihan yaitu mudah untuk di proses, pada pembentukannya tidak memerlukan panas atau tekanan, relatif lebih murah, lebih kuat dibandingkan dengan *thermoplastic*. Salah satu jenis *thermosetting* yang paling umum adalah *epoxy*. *Epoxy* memiliki kelebihan yaitu resistansi impak yang tinggi, dapat digunakan pada kondisi lingkungan bertemperatur tinggi, dan tahan terhadap tegangan bernilai ekstrem.

*Thermoplastic* berkebalikan dengan *thermosetting*. *Thermoplastic* akan mencair dan mudah dibentuk ketika dipanaskan dan kaku ketika dikeringkan, proses tersebut dapat diulang (*reversible*). *Thermoplastic* yang paling umum digunakan adalah *polyethylene*.

### 2.3.2 Carbon Fiber Epoxy

*Carbon fiber epoxy* merupakan komposit dengan jenis penguat berupa *carbon fiber* dan matriks *epoxy*. Diketahui *carbon fiber epoxy* memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan material lainnya. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.20. Penggunaan *carbon fiber epoxy* juga sudah meluas terutama dibidang otomotif dan *aerospace*. Kelebihan lain yang dimiliki oleh komposit ini adalah pengurangan berat dibandingkan penggunaan material seperti baja. (Campbell, 2011, p.42).



Gambar 2.20 Diagram modulus-kekuatan material  
Sumber: Campbell (2010,p. 13)

Pembuatan *carbon fiber epoxy* dapat melalui beberapa cara. Diantaranya adalah pelapisan dan *infusion*. Pelapisan atau *painting* dilakukan dengan cara melapiskan *epoxy* pada *fabric* atau kain *carbon fiber*. Setelah lapisan ditumpuk sesuai jumlah yang diinginkan, struktur komposit melalui proses curing dengan sumber panas eksternal. Untuk proses *infusion*, digunakan tekanan yang tinggi dan pompa vakum. Tumpukan dari lapisan komposit diberikan *epoxy* dengan cara memberikan tekanan yang tinggi. Setelah itu dilakukan proses *curing*.

## 2.4 Strength of Materials

Kekuatan material adalah ilmu yang mempelajari tentang hubungan antara gaya internal dan eksternal, dan deformasi (Dieter, 1961, p.5). Struktur yang akan dianalisis kekuatannya harus diasumsikan dalam keadaan *equilibrium* atau seimbang. Persamaan keseimbangan statis dapat digunakan untuk menganalisis gaya eksternal yang bekerja pada sebuah struktur dan gaya internal dianggap sebagai gaya yang menahan gaya eksternal tersebut. Gaya internal dapat diartikan sebagai tegangan yang bekerja pada sebuah luasan (Dieter, 1961, p.5). Gaya internal dapat diperoleh dengan mengukur dan menganalisis distribusi regangan pada sebuah struktur, karena tegangan tidak dapat diukur secara fisik.

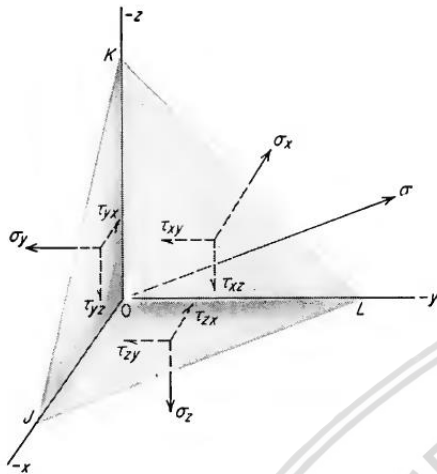
Hal penting yang harus diingat ketika menganalisis kekuatan suatu material struktur adalah struktur dianggap kontinu, homogen, dan *isotropic*. Pada sebuah struktur dianggap tidak ada ruang kosong di dalamnya, memiliki sifat yang identik di setiap titiknya, dan tidak bergantung kepada arah atau orientasi. Pada kenyataannya, material secara umum jika dilihat dalam skala mikro, tidak memenuhi persyaratan diatas. Tetapi, persamaan kesetimbangan tetap dapat diaplikasikan karena dalam skala mikro, ukuran butir sangat kecil. Maka dari itu, material dalam skala mikro dapat dikatakan bersifat homogen dan isotropik.

## 2.5 Analisis Tegangan dan Regangan

Jika beban yang diberikan pada struktur statis atau berubah relatif terhadap waktu dan diberikan sama pada suatu penampang atau permukaan, sifat mekanik dari struktur tersebut dapat dicari dengan menggunakan pengujian tegangan regangan (Callister, 2009, p.152). Regangan ditentukan oleh seberapa besar tegangan yang terjadi pada sebuah struktur. Pada benda 3 dimensi, kondisi tegangan terdiri dari tiga persamaan tegangan berbeda yang bekerja pada satu titik. Kondisi tegangan diketahui sebagai *cylindrical* jika 2 dari 3 persamaan bernilai sama. Jika kondisi 3 persamaan bernilai sama maka disebut *hydrostatic*

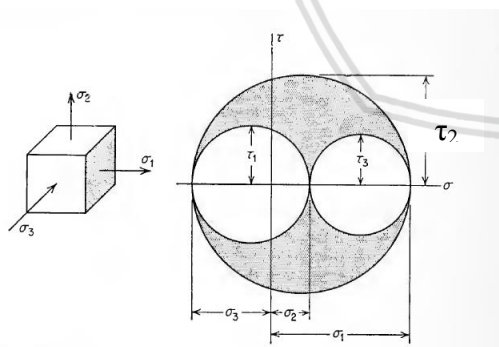


atau *spherical*. Gambar 2.21 menunjukkan bidang diagonal JKL pada sebuah area A. Bidang JKL merupakan *plane* tegangan,  $\sigma$  merupakan tegangan yang bekerja normal terhadap bidang JKL. I, m, dan n merupakan arah cosinus dimana sudutnya diantara  $\sigma$  dan sumbu x, y, z.



Gambar 2.21 Tegangan yang bekerja pada bidang 3 dimensi  
Sumber: Dieter (1961,p. 25)

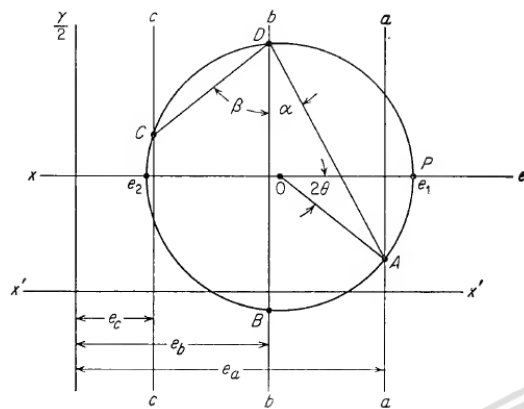
Menentukan tegangan pada suatu titik dapat dilakukan dengan metode grafis Mohr. Gambar 2.22 merupakan lingkaran Mohr untuk tegangan yang bekerja pada kondisi 3 dimensi. Dengan lingkaran Mohr, kondisi dari komponen tegangan yang bekerja terhadap berbagai sumbu mudah dimengerti.



Gambar 2.22 Lingkaran Mohr untuk tegangan pada kondisi 3 dimensi  
Sumber: Dieter (1961,p. 28)

Menganalisis tegangan secara langsung tidak dapat dilakukan. Untuk itu diperlukan analisis regangan yang berdasar kepada regangan yang diukur. Alat yang paling umum digunakan untuk mengukur regangan adalah *strain gage*. Metode lain yang dapat digunakan untuk mencari regangan adalah dengan lingkaran Mohr. Gambar 2.23

menunjukkan lingkaran Mohr untuk mencari regangan. Regangan normal digambar pada sumbu x, dan regangan geser yang dibagi dua digambar sepanjang sumbu y.



Gambar 2.23 Lingkaran Mohr untuk regangan

Sumber: Callister (2001,p. 196)

Secara umum hubungan tegangan dan regangan dapat dilihat pada persamaan Hukum Hooke, yaitu:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2-1)$$

dimana:

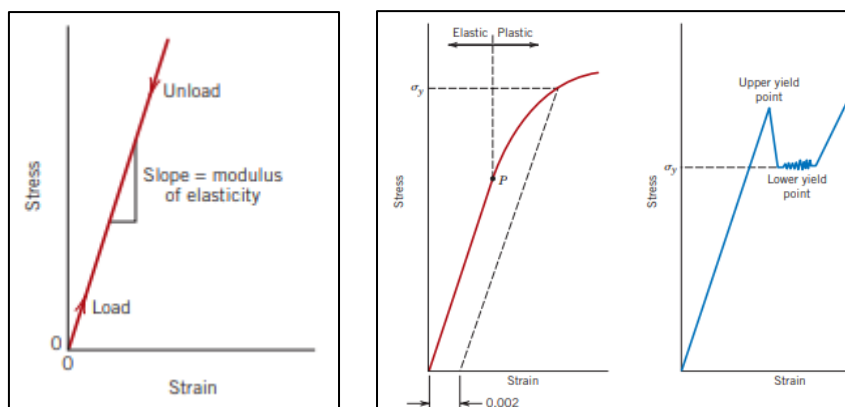
$\sigma$  = tegangan (MPa)

E = modulus elastisitas / Modulus Young (GPa)

$\varepsilon$  = regangan

Hukum Hooke mengatakan bahwa pada struktur yang diberi tegangan, regangan sepanjang suatu sumbu diakibatkan oleh tegangan yang bekerja pada sumbu tersebut ditambah dengan regangan yang dihasilkan oleh efek Poisson tegangan sumbu lainnya (Dieter, 1961, p.36).

Modulus Young menggambarkan kekakuan, atau ketahanan material terhadap deformasi elastis. Semakin besar nilai modulus maka semakin kaku suatu material karena regangan elastis yang terjadi kecil. Gambar 2.22 merupakan contoh dari kurva tegangan – regangan. Deformasi dimana tegangan dan regangan yang ada pada struktur proporsional disebut dengan deformasi elastis. Deformasi elastis adalah apabila beban yang bekerja dihilangkan, maka material kembali ke bentuk semula.



Gambar 2.24 Diagram tegangan-regangan material

Sumber: Callister (2009)

Pada umumnya struktur didesain dengan tujuan ketika terdapat tegangan yang bekerja maka hanya deformasi elastis yang terjadi. Maka dari itu tegangan pada saat deformasi plastis dimulai perlu diketahui. Pada Gambar 2.24 titik P dapat disebut sebagai batas proporsional, yaitu dimana deformasi plastis terjadi. Pada beberapa diagram tegangan – regangan, batas proporsional sulit dicari. Untuk hal tersebut dapat digunakan metode *offset*. Garis lurus digambar sejajar terhadap garis daerah elastis dari tegangan regangan berjarak 0.002 (Callister, 2002, p.163). Untuk material dimana pada kurva tegangan – regangan sudah jelas batas proporsionalnya, metode ini tidak perlu digunakan.

Pada *simple beam* seperti pada Gambar 2.25 jika diatas dari *beam* diberi beban maka tegangan yang dihasilkan pada bagian atas merupakan *compressive stress* dan pada bagian bawah merupakan *tensile stress*. Pada umumnya beban yang diberikan pada *beam* tegak lurus terhadap sumbu dari *beam*. Kedua tegangan tersebut dapat disebut sebagai tegangan *flexural*. Tegangan pada *simple beam* dapat dicari dengan Persamaan (2-2).



Gambar 2.25 Simple beam

Sumber: Beer (2015,p.346)

$$\sigma = \frac{M y}{I} \quad (2-2)$$

dimana:

$\sigma$  = tegangan (MPa)

$M$  = momen *bending* pada *beam*

$I$  = inersia *beam*

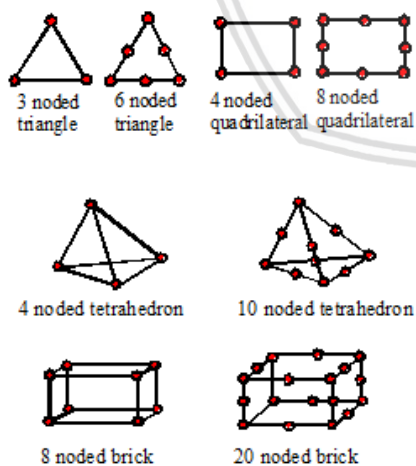
$y$  = jarak dari sumbu netral pada *beam*

Tegangan yang dihasilkan dari *beam* dapat dijadikan tolak ukur dari kekuatan sebuah struktur tersebut. Pada umumnya *normal stress* pada *beam* dijadikan kriteria utama dalam mendesain sebuah *beam*.

## 2.6 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM) dapat didefinisikan sebagai langkah – langkah penyelesaian secara numeric dimana objek yang dianalisis dibagi menjadi beberapa bagian kecil. Bagian kecil tersebut disebut elemen yang jumlahnya hingga (*finite*) tergantung dari objek yang dianalisa. Setiap elemen dihubungkan oleh noda (*node*). Metode ini dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah dalam bidang teknik. Kelebihan dari metode ini dapat digunakan pada struktur yang memiliki geometri, pembebanan yang rumit. Gambar 2.25 merupakan beberapa jenis dari elemen.

Untuk analisis dari struktur komposit, elemen dengan bentuk *triangle* dan *quadrilateral* umum digunakan. Komposit dapat dianggap sebagai sebuah struktur *shell* pada saat analisis dilakukan. Semakin banyak jumlah noda pada sebuah elemen akan menghasilkan hasil perhitungan yang semakin akurat.



Gambar 2.26 Macam – macam elemen  
Sumber: Nath (2015)

Langkah umum dari penyelesaian dengan menggunakan Metode Elemen Hingga adalah:

1. Membagi struktur yang dianalisa menjadi sejumlah elemen. Variabel yang akan dicari nilainya dihitung pada noda. Pada segitiga dengan tiga noda contohnya, variabel dapat digambarkan seperti persamaan:

$$\varphi(x,y) = N1(x,y) \varphi1 + N2(x,y) \varphi2 + N3(x,y) \varphi3 \quad (2-2)$$

dimana:

$\varphi1, \varphi3, \varphi2$  = variabel yang akan dicari nilainya pada noda

$N1, N2, N3$  = *shape functions*

2. Menganalisis derajat kebebasan dari objek. Untuk objek segitiga dengan tiga noda, diketahui memiliki tiga derajat kebebasan. Pada umumnya, jumlah derajat kebebasan yang berhubungan dengan metode elemen hingga jumlahnya sama dengan jumlah noda yang terdapat pada suatu struktur.
3. Membuat matriks kekakuan. Matriks kekakuan terdiri dari tingkah laku dan geometri sebuah material yang menggambarkan resistansi material tersebut terhadap deformasi ketika beban diberikan. Contoh dari matriks kekakuan pegas dengan satu elemen adalah

$$[Kg] = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

dimana:

$[Kg]$  = matrik kekakuan global

$k$  = konstanta pegas

4. Memasukkan matriks kekakuan kedalam persamaan global struktur. Persamaan global struktur yang digunakan adalah persamaan pegas, yaitu:

$$[Kg]\{q\} = \{F\} \quad (2-4)$$

dimana:

$[Kg]$  = matrik kekakuan global

$\{q\}$  = perpindahan noda

$\{F\}$  = beban total

5. Menentukan kondisi batas dari struktur. Kondisi batas ini dapat dilihat dari pembebanan yang diberikan kepada struktur. Setelah kondisi batas ditentukan, Persamaan (2-4) dapat diselesaikan dan didapat hasil yang dicari.



## 2.7 Software berbasis FEA

Pada penelitian kali ini, digunakan *software* ANSYS v.18.2. *Software* ini merupakan jenis *software* berbasis *Finite Element Analysis* yang berfokus pada simulasi dalam bidang teknik. Berdasarkan dengan metode elemen hingga, *software* ini membantu menyelesaikan masalah dalam memprediksikan sifat dari sebuah struktur dalam situasi nyata. Penggunaan *software* seperti ini sangat efektif dalam menghemat biaya dan waktu yang dibandingkan dengan pengujian nyata. Struktur dengan bentuk kompleks dapat dianalisis dengan menggunakan *software* ini. Objek dan kondisi batas yang akan diamati pada penelitian ini dapat dengan mudah diatur dan disesuaikan dengan kebutuhan. Selain menganalisis tingkah laku struktural, *software* ini juga dapat digunakan untuk menganalisis termal, dinamika fluida, dan sebagainya.

## 2.8 Hipotesis

Banyak hal yang dapat diketahui dari tinjauan pustaka diatas. Setelah dianalisis, dapat diperoleh beberapa hipotesis dari permasalahan penelitian. Hipotesis dari penelitian kali ini yaitu variasi sudut orientasi yang berbeda pada *laminat* komposit *carbon fiber* akan menghasilkan nilai tegangan dan deformasi yang berbeda pada struktur *monocoque chassis* untuk *prototype* mobil hemat energi. Selain itu, akan dihasilkan variasi sudut orientasi terbaik *laminat carbon fiber* pada struktur *monocoque chassis prototype* mobil hemat energi.

## **BAB III METODE PENELITIAN**

### **3.1 Metode Penelitian**

Metode penelitian yang dipilih untuk penelitian kali ini adalah simulasi dengan menggunakan *software* berbasis *Finite Element Analysis* (FEA). Metode ini dipilih berdasarkan efisiensi waktu, biaya dan keakuratan data yang dihasilkan. Segala informasi yang diperlukan untuk menunjang penelitian ini diperoleh dari buku pustaka, jurnal, dan lain – lainnya.

### **3.2 Tempat dan Waktu Penelitian**

Tempat dilakukannya penelitian terletak di Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Penelitian dilakukan pada bulan Februari 2018 – selesai.

### **3.3 Variabel Penelitian**

Variabel dapat dikatakan sebagai suatu objek yang memiliki nilai dan digunakan sebagai sifat atau ciri dari sebuah penelitian. Beberapa variabel yang ditentukan pada penelitian kali ini, yaitu:

#### **1. Variabel Bebas**

Variabel bebas nilainya tidak dipengaruhi oleh variabel lain. Variabel bebas merupakan variabel yang nilainya akan mempengaruhi variabel lain. Variabel bebas pada penelitian kali ini merupakan sudut orientasi *layer* komposit. Model susunan sudut orientasi dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1  
Model Susunan Sudut Orientasi

Model	Sudut Orientasi					
	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6
1	0	45	90	90	45	0
2	0	0	45	45	90	90
3	45	90	0	0	90	45
4	45	45	90	90	0	0
5	90	0	45	45	0	90
6	90	90	0	0	45	45

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa pada model 1, 3, dan 5 merupakan susunan *symmetrical* pada komposit *carbon fiber*. Susunan *symmetrical* pada komposit *carbon fiber* adalah dimana susunan sudut orientasi sebelum *mid-plane* merupakan cerminan susunan sudut orientasi sesudah *mid-plane*. Untuk model 2, 4, dan 6 merupakan susunan *non-symmetrical* pada komposit *carbon fiber*.

## 2. Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas. Pada penelitian kali ini, variabel terikat yang diamati adalah tegangan dan deformasi yang terjadi pada struktur *monocoque chassis* akibat beban yang diberikan melalui simulasi.

## 3. Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol dapat dikatakan variabel yang nilainya ditentukan dan tidak berubah selama penelitian. Variabel terkontrol dalam penelitian kali ini, yaitu :

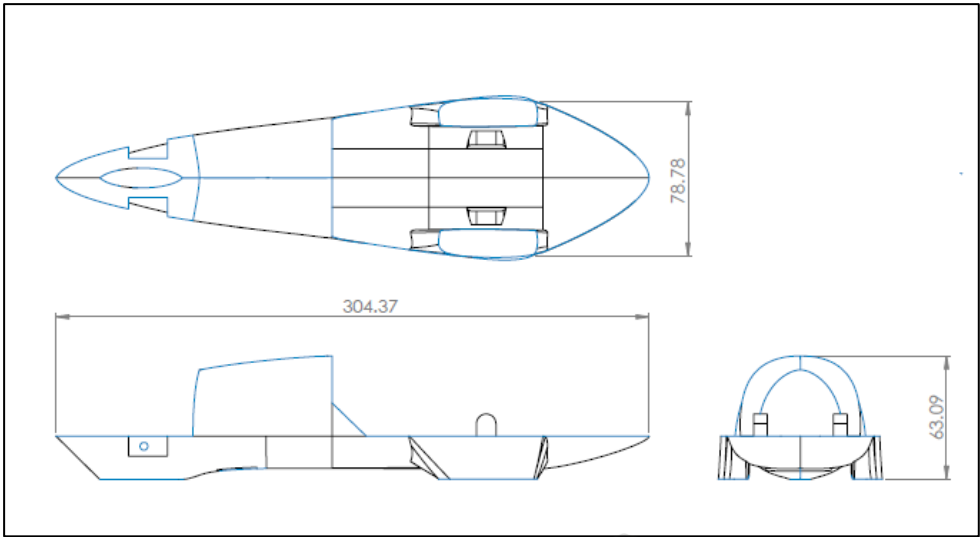
- Chassis* yang digunakan merupakan jenis *monocoque* pada *prototype* mobil hemat energi.
- Jumlah *layer* pada komposit *carbon fiber* adalah 6 *layer*.
- Sudut yang digunakan adalah kombinasi dari sudut 0°, +45°, -45°, 90°.
- Tebal kain satu lapis *carbon fiber* adalah 0.3 mm.
- Tebal *epoxy* sebesar 0.01 mm.

## 3.4 Pemodelan Objek Penelitian

Pemodelan objek penelitian merupakan penjelasan mengenai geometri, pembebanan, dan material yang digunakan pada penelitian kali ini. Pemodelan penelitian ini, yaitu :

### 1. Pemodelan Geometri

Geometri dari struktur *monocoque chassis* untuk *prototype* mobil hemat energi dapat dilihat pada Gambar 3.1.



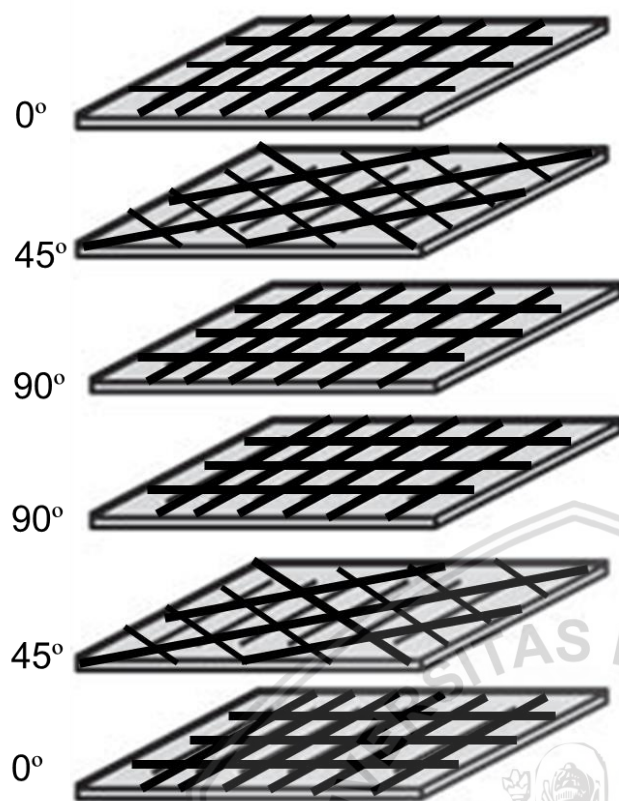
Gambar 3.1 Geometri struktur chassis monocoque

2. Pemodelan Material

Material yang digunakan merupakan *Wet Woven Carbon Fiber* dengan jenis resin *Epoxy* yang memiliki *material properties* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.2

Tabel 3.2  
*Material Properties* dari *Wet Woven Carbon Fiber* dengan Resin *Epoxy*

<i>Material Properties</i>	<i>Carbon Fiber</i>	<i>Material Properties</i>	<i>Epoxy</i>
<i>Ultimate Tensile Strength, S<sub>ux</sub> (MPa)</i>	600	<i>Density, ρ (g/cm<sup>3</sup>)</i>	1.3
<i>Ultimate Tensile Strength, S<sub>uy</sub> (MPa)</i>	600	<i>Tensile Yield Strength, S<sub>y</sub> (MPa)</i>	90
<i>Ultimate Tensile Strength, S<sub>uz</sub> (MPa)</i>	50	<i>Modulus Elastisitas, E (MPa)</i>	3450
<i>Modulus Elastisitas, E<sub>x</sub> (MPa)</i>	70000	<i>Modulus Geser, G (MPa)</i>	1277.8
<i>Modulus Elastisitas E<sub>y</sub> (MPa)</i>	70000	<i>Poisson's Ratio</i>	0.35
<i>Modulus Elastisitas E<sub>z</sub> (MPa)</i>	7500		
<i>Modulus Geser, G<sub>xy</sub> (MPa)</i>	5000		
<i>Modulus Geser, G<sub>xz,yz</sub> (MPa)</i>	2700		
<i>Poisson's Ratio<sub>xy</sub></i>	0.1		
<i>Poisson's Ratio<sub>yz, xz</sub></i>	0.3		



Gambar 3.2 Contoh pemodelan material untuk model 1

Pada Gambar 3.2 mengilustrasikan pemodelan dari *laminated woven carbon fiber* untuk model 1. Dimana *layer* pertama memiliki sudut orientasi  $0^\circ$ , *layer* kedua memiliki sudut  $45^\circ$ , dan *layer* ketiga memiliki sudut  $90^\circ$ . Karena model 1 merupakan *laminated woven carbon fiber* dengan susunan sudut orientasi simetri maka model 1 dapat dituliskan menjadi  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ]_s$ . Untuk model yang memiliki susunan sudut orientasi yang tidak simetri penulisannya dapat dituliskan berurutan dimana setiap *layer* dipisahkan dengan garis miring. Seperti contoh untuk model 2 dapat dituliskan dengan  $[0_2/45_2/90_2]$ . Dimana angka *subscript* menandakan pengulangan sudut orientasi pada *layer* setelahnya.

### 3. Pemodelan Pembebanan

Pembebanan yang diberikan pada struktur *chassis* diperoleh dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$W = m \cdot g \quad (3-1)$$

keterangan:

W = gaya berat (N)

m = massa benda (Kg)



$g$  = gravitasi ( $m/s^2$ )

Berikut adalah perhitungan beban yang diberikan kepada struktur dalam penelitian ini :

- Gaya Berat Pengemudi

$$W_{driver} = m_{driver} \cdot g$$

$$W_{driver} = 90 \text{ Kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2$$

$$W_{driver} = 900 \text{ N}$$

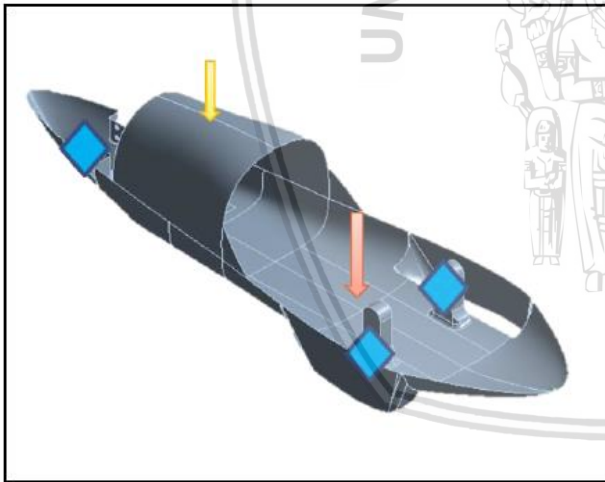
- Gaya Berat Engine

$$W_{engine} = m_{driver} \cdot g$$

$$W_{engine} = 30 \text{ Kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2$$

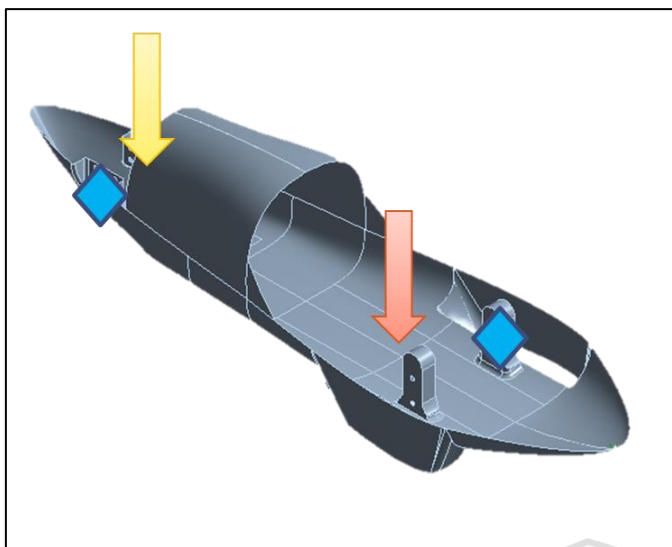
$$W_{engine} = 300 \text{ N}$$

Pemodelan pembebanan pada *software* ANSYS v.18.2 untuk *vertical bending* dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan untuk *torsional load* dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.3 Pemodelan pembebanan *vertical bending* pada struktur *chassis monocoque*

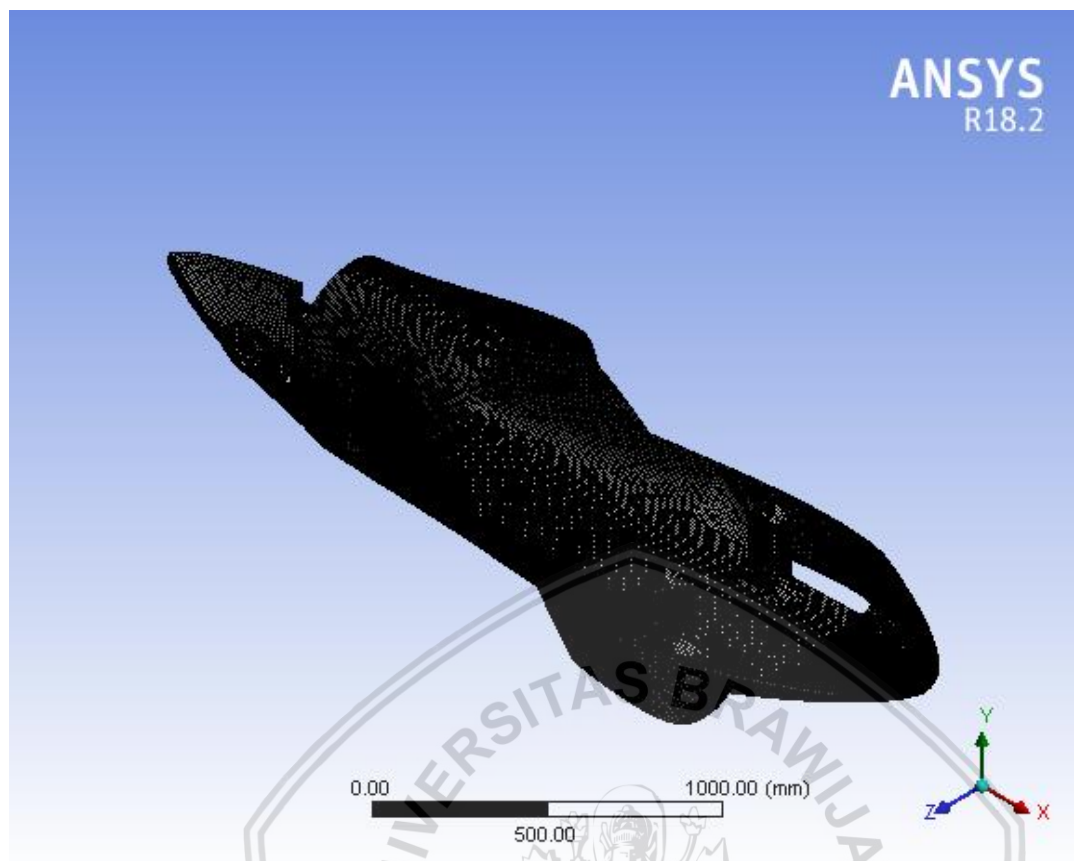
Pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4 tanda panah berwarna kuning menandakan beban *engine*. Beban *engine* diberikan di bagian belakang struktur *chassis*. Tanda panah biru menandakan beban dari *driver*. Beban *driver* diberikan dibagian depan struktur *chassis*. Pada pembebanan *vertical bending chassis* diberikan *fix support* sedangkan pada pembebanan *torsional load*, *fix support* dihilangkan satu. *Fix support* diberikan dibagian depan dan belakang dimana tumpuan roda berada.



Gambar 3.4 Pemodelan pembebanan *torsional load* pada struktur *chassis monocoque*

### 3.5 Meshing

*Meshing* merupakan proses pembagian struktur yang dianalisis menjadi elemen – elemen yang berjumlah (hingga). Fungsi dari *meshing* adalah ketika beban diberikan pada struktur, beban akan terdistribusi merata pada elemen – elemen tersebut. Semakin kecil ukuran *meshing* akan menghasilkan hasil yang semakin akurat. Ukuran *mesh* yang digunakan pada penelitian kali ini yaitu 10 mm. Jenis elemen yang digunakan yaitu SHELL181. Hasil *meshing* dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Meshing pada struktur *chassis monocoque*

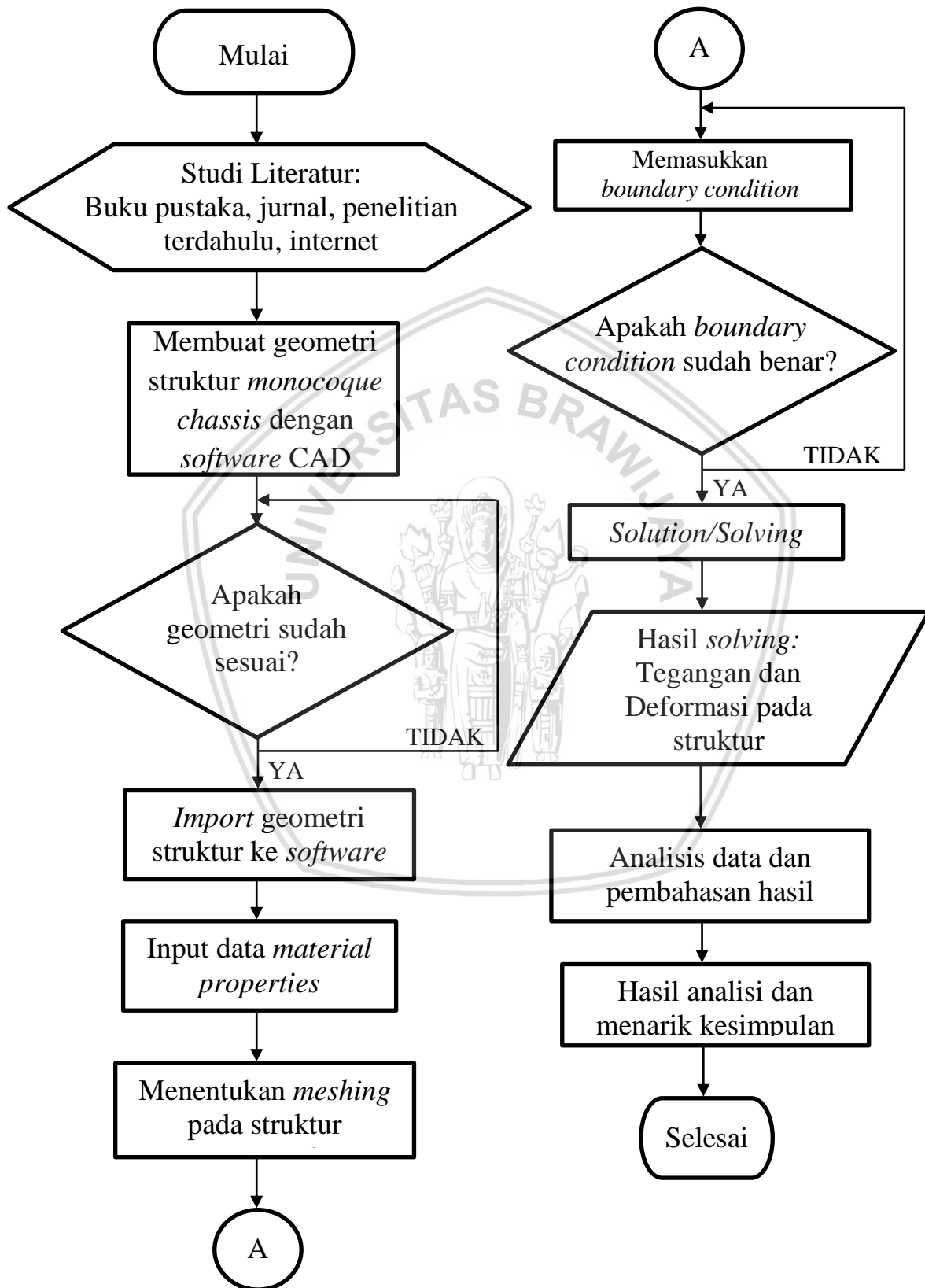
### 3.6 Prosedur Penelitian

Langkah – langkah yang dilakukan untuk penelitian kali ini adalah:

1. Melakukan studi literatur dari sumber – sumber yang terpercaya seperti jurnal, buku pustaka, dan sebagainya.
2. Membuat pemodelan struktur *chassis monocoque* untuk *prototype* mobil hemat energi dengan menggunakan *software* CAD.
3. Memindahkan model struktur ke dalam *software* ANSYS v.18.2 untuk diproses.
4. Membuat ACP Pre pada ANSYS v.18.2 untuk memasukkan data – data yang berkaitan dengan material komposit seperti tebal *layer*, *mesh*, dan sudut orientasi.
5. Memasukkan data yang dihasilkan dari ACP Pre ke dalam *Static Structural* pada ANSYS v.18.2 untuk diberikan pembebanan. Hasil dapat dilihat setelah diproses.
6. Menganalisis data yang dihasilkan dari ANSYS v.18.2 dengan menggunakan *software* Microsoft Excel 2010.
7. Membuat pembahasan dari data yang telah di analisis.
8. Menarik kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

### 3.7 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian kali ini dapat dilihat dibawah ini.



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Verifikasi Data

Verifikasi data dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan hasil perhitungan dengan data dari *software* ANSYS v.18.2 yang digunakan. Pada komposit carbon fiber tegangan per *layer* dapat digambarkan dengan Persamaan (4-1).

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

dimana:

$\sigma_{x,y}$  = tegangan arah sumbu x dan y

$\epsilon_{x,y}$  = regangan arah sumbu x dan y

$\gamma_{x,y}$  = regangan geser bidang x dan y

$Q$  = komponen kekakuan komposit

Matriks  $Q$  merupakan matriks kekakuan *layer* komposit dimana nilainya didapatkan dari Persamaan (4-2).

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (4-2)$$

dimana:

$E_1$  = modulus elastisitas pada sumbu x

$E_2$  = modulus elastisitas pada sumbu y

$\nu_{12}$  = *Poisson ratio* xy

$\nu_{21}$  = *Poisson ratio* yx

$G_{12}$  = modulus geser pada bidang xy

Setelah didapatkan matriks kekakuan komposit, komponen  $Q$  akan diubah menjadi matriks transformasi kekakuan komposit seperti pada Persamaan (4-3).



$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4-3)$$

Dimana nilai komponen Q diperoleh dari Persamaan (4-4).

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}\cos^4\theta + Q_{22}\sin^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\cos^2\theta\sin^2\theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})\cos^2\theta\sin^2\theta + Q_{12}(\cos^4\theta + \sin^4\theta) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}\sin^4\theta + Q_{22}\cos^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\cos^2\theta\sin^2\theta \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})\cos^3\theta\sin\theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})\sin^3\theta\cos\theta \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})\sin^3\theta\cos\theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})\cos^3\theta\sin\theta \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})\cos^2\theta\sin^2\theta + Q_{66}(\cos^4\theta + \sin^4\theta) \end{aligned} \quad (4-4)$$

dimana:

$\theta$  = sudut orientasi *layer* komposit

Nilai matriks transformasi kekakuan komposit akan diubah menjadi matriks ABD seperti pada Persamaan (4-5).

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (4-5)$$

Matriks A adalah matriks *laminat extensional stiffness*, matriks B adalah matriks *laminat coupling stiffness*, dan matriks D adalah matriks *laminat bending stiffness*. Nilai komponen A, B, D masing-masing didapat dari Persamaan (4-6).

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k z dz = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k z^2 dz = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned} \quad (4-6)$$

dimana:

$z$  = jarak dari *middle surface* ke *layer*

$k$  = *layer* terdekat

Dengan menggunakan persamaan-persamaan diatas dapat diperoleh matriks ABD dari semua pemodelan. Pada model satu dimana memiliki sudut orientasi [0/45/90]s memiliki matriks ABD yang bernilai:

$$\begin{bmatrix} A & \vdots & B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B & \vdots & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 111378.40 & 28886.99 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 28886.99 & 111378.40 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25154.80 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 33065.88 & 7275.97 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7275.97 & 33065.88 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6202.34 \end{bmatrix}$$

Perhitungan diatas sudah sesuai dengan matriks yang digunakan pada *software* ANSYS v.18.2. Matriks ABD komposit *carbon fiber* untuk model 1 pada ANSYS v.18.2 dapat dilihat pada Gambar 4.1.

i	0	1	2	3	4	5	6
0	1.1138e+05	28887	1.3036e-12	0	-2.2737e-13	0	0
1	28887	1.1138e+05	-1.3036e-12	-2.2737e-13	0	0	0
2	2.395e-12	-2.395e-12	25155	0	0	0	0
3	0	-2.2737e-13	0	33066	7276	6.7039e-13	0
4	-2.2737e-13	0	0	7276	33066	-6.7039e-13	0
5	0	0	0	9.1457e-13	-9.1457e-13	6202.3	0
6	0	0	0	0	0	0	4923.9
7	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.1 Matriks ABD model 1 pada ANSYS v.18.2

## 4.2 Analisis Tegangan Pada Chassis

Tegangan pada struktur komposit dapat dianalisis melalui Persamaan (4-7).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 + zk_x^0 \\ \epsilon_y^0 + zk_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 + zk_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (4-7)$$

dimana:

$\sigma_{x,y}$  = tegangan arah sumbu x dan y

$\epsilon_{x,y}$  = regangan arah sumbu x dan y

$\gamma_{x,y}$  = regangan geser bidang x dan y

$\bar{Q}$  = komponen matriks transformasi kekakuan komposit

$zk$  = tebal *laminate*

Matriks dari kekakuan komposit perlu diubah kedalam sistem global dengan tujuan untuk menghitung kekuatan dari lamina ke *laminate*. Hal tersebut dapat digambarkan ke dalam Persamaan (4-2).

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}^{-1} [\bar{Q}] \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

dimana:

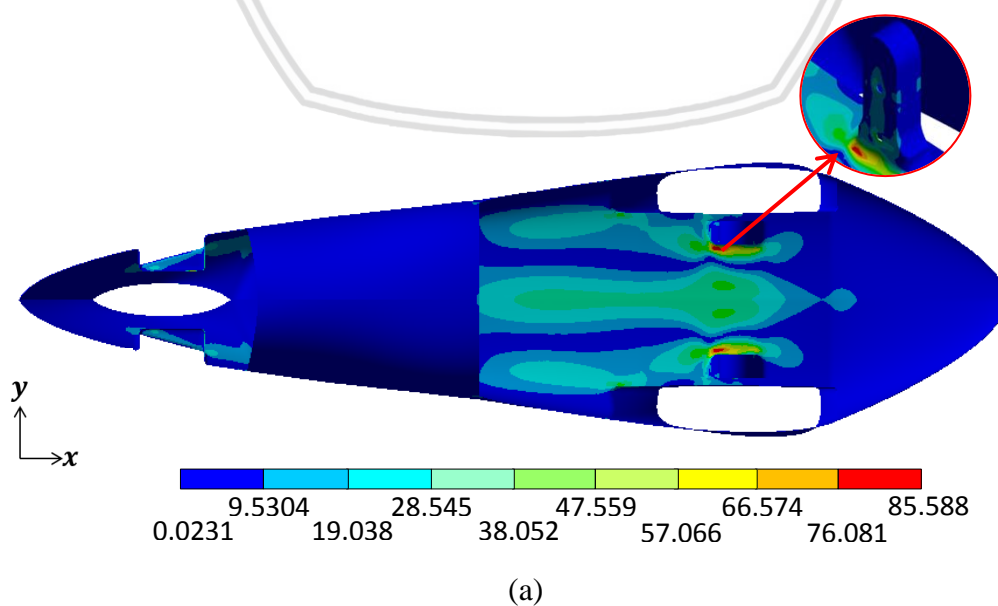
$$m = \cos \theta$$

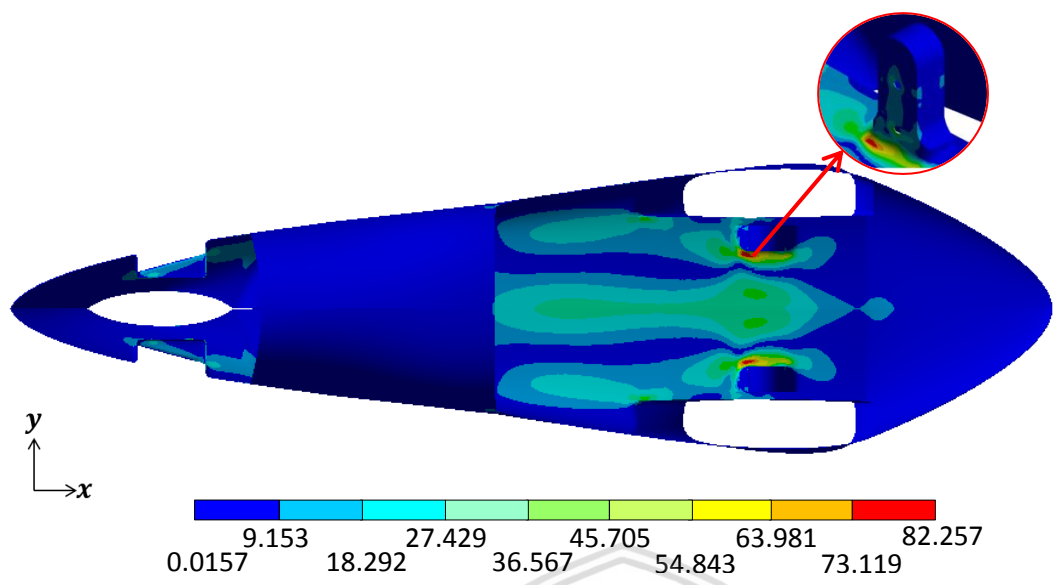
$$n = \sin \theta$$

Dari Persamaan (4-8) dapat dilihat bahwa sudut ( $\theta$ ) mempengaruhi dari tegangan yang terjadi pada struktur *laminate* komposit. Sudut yang dimaksud adalah sudut orientasi pada *layer* struktur komposit.

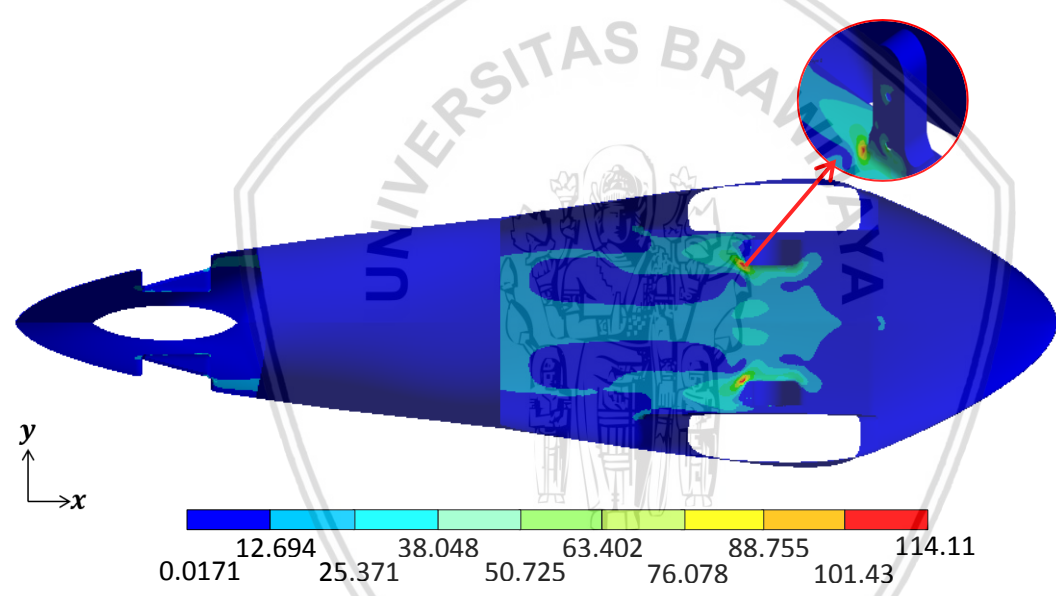
#### 4.1.1 Analisis Tegangan Akibat *Vertical Bending*

Pengujian *vertical bending* dilakukan dengan memodelkan 6 kombinasi sudut orientasi dari *layer carbon fiber* yang berbeda. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan *fix support* dimana roda akan ditempatkan. Beban yang diberikan pada *chassis* merupakan beban *driver* dan juga beban mesin. Distribusi tegangan pada ke-enam model dapat dilihat seperti pada Gambar 4.2. Daerah berwarna merah merupakan nilai tegangan maksimum yang terjadi pada struktur *chassis*. Sedangkan daerah berwarna biru merupakan daerah dimana tegangan minimum pada struktur *chassis* terjadi.

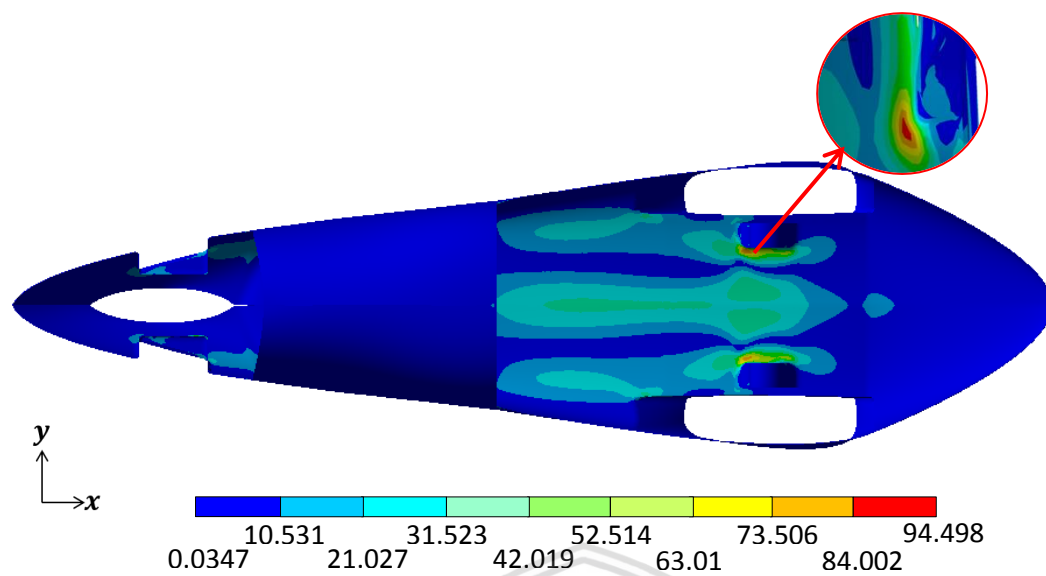




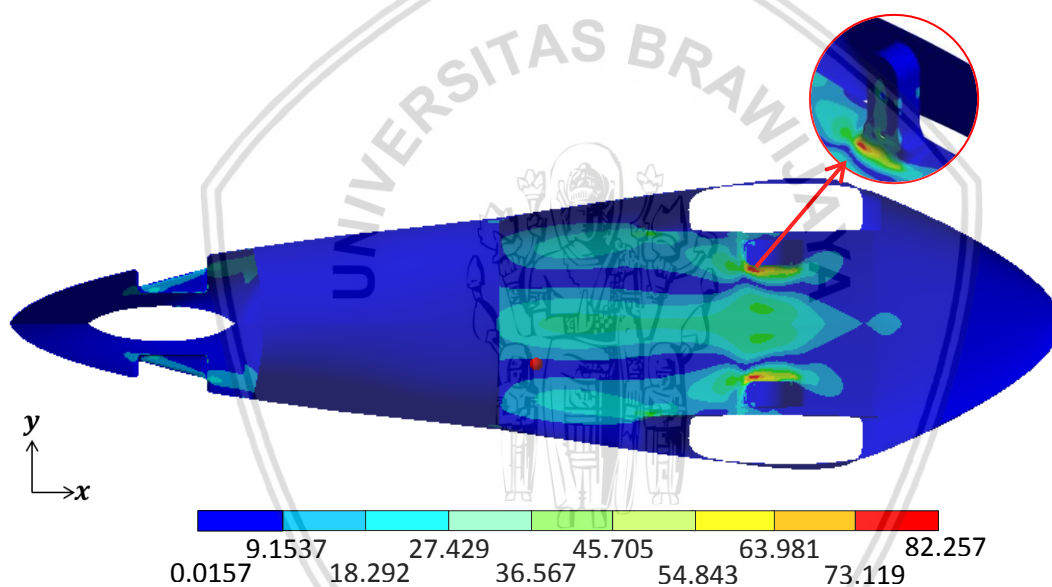
(b)



(c)

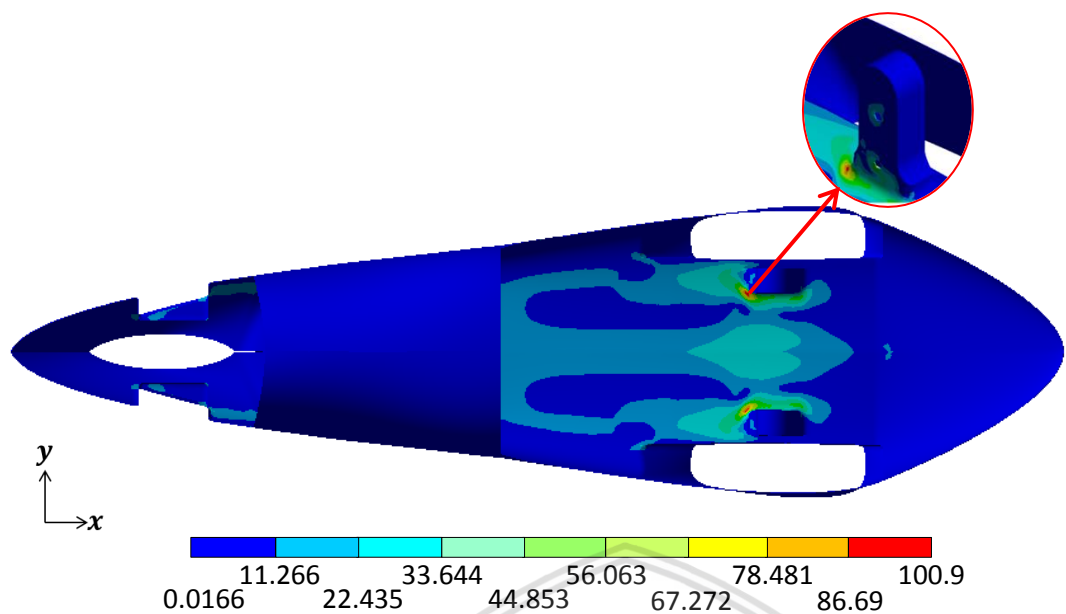


(d)



(e)





(f)

Gambar 4.2 Distribusi tegangan struktur chassis (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3 (d) model 4 (e) model 5 (f) model 6 (MPa)

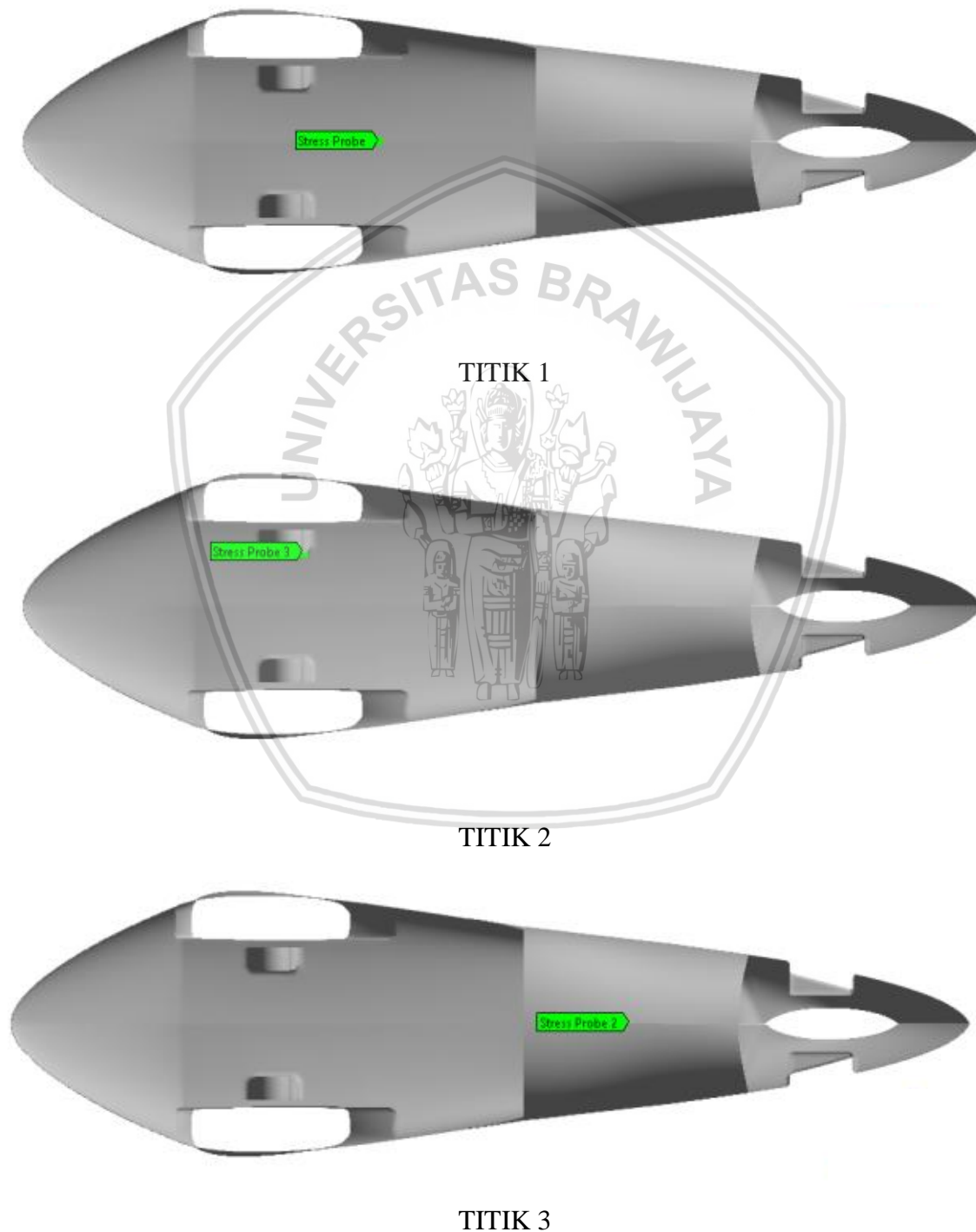
Nilai tegangan maksimum dari enam model struktur chassis dapat dilihat pada Tabel 4.1. Dapat dilihat bahwa dari ke-enam model tersebut bahwa tegangan yang terjadi pada chassis pada umumnya bernilai minimum dimana daerah yang berwarna biru hampir menyelimuti seluruh struktur chassis. Daerah tegangan maksimum yang berwarna merah pada chassis pada semua model terletak di bagian tumpuan untuk roda kendaraan.

Tabel 4.1  
Nilai Tegangan Maksimum Seluruh Model Struktur Monocoque Chassis Akibat Vertical Bending

Model	Kode Sudut Orientasi	Nilai Tegangan Maksimum (MPa)
1	[0/45/90]s	85.588
2	[0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> ]	82.257
3	[45/90/0]s	114.11
4	[45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> ]	94.498
5	[90/0/45]s	82.257
6	[90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> ]	100.9

Pada Tabel 4.1 terlihat bahwa nilai tegangan maksimum tertinggi terdapat pada model ketiga yaitu sebesar 114.11 MPa. Nilai tegangan maksimum terendah terletak pada model kedua dan kelima yaitu sebesar 82.257 MPa. Model dengan sudut orientasi 45° pada layer ke-enam dari laminate carbon fiber memiliki nilai tegangan maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan sudut 0° dan 90°. Hal ini diakibatkan oleh arah beban yang tidak

searah dengan arah orientasi dari *fiber* pada komposit *carbon fiber* itu sendiri. Model kedua dan kelima memiliki nilai tegangan maksimum yang sama dikarenakan penggunaan *carbon fiber* dengan jenis *woven* dimana tidak ada perbedaan antara  $0^\circ$  dan  $90^\circ$ . Nilai tegangan yang terjadi juga dapat ditinjau pada beberapa titik yang sama untuk setiap modelnya seperti pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Titik-titik yang ditinjau pada struktur *chassis*

Titik 1 terletak pada bagian *chassis* dimana *driver* terletak pada kendaraan. Titik 2 terletak pada bagian atas *chassis* dimana pada bagian ini komponen pintu akan diletakkan. Titik 3 terletak pada bagian untuk tumpuan roda pada kendaraan. Ketiga titik tersebut dipilih untuk mengetahui perbedaan tegangan yang terjadi pada penampang yang berbeda-beda. Nilai tegangan yang terjadi pada penampang tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2

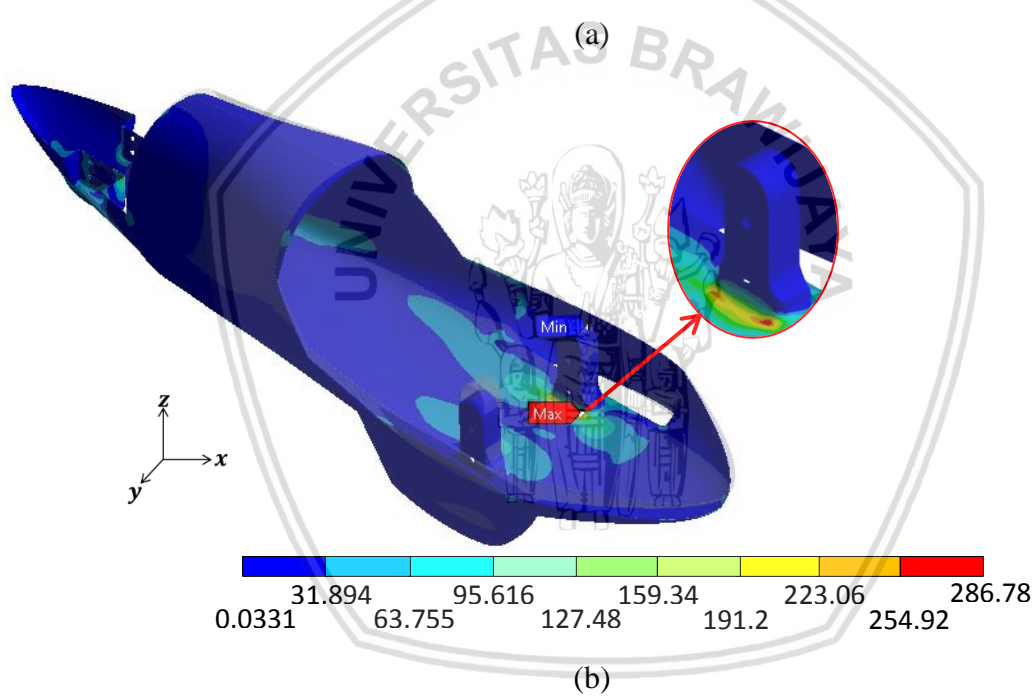
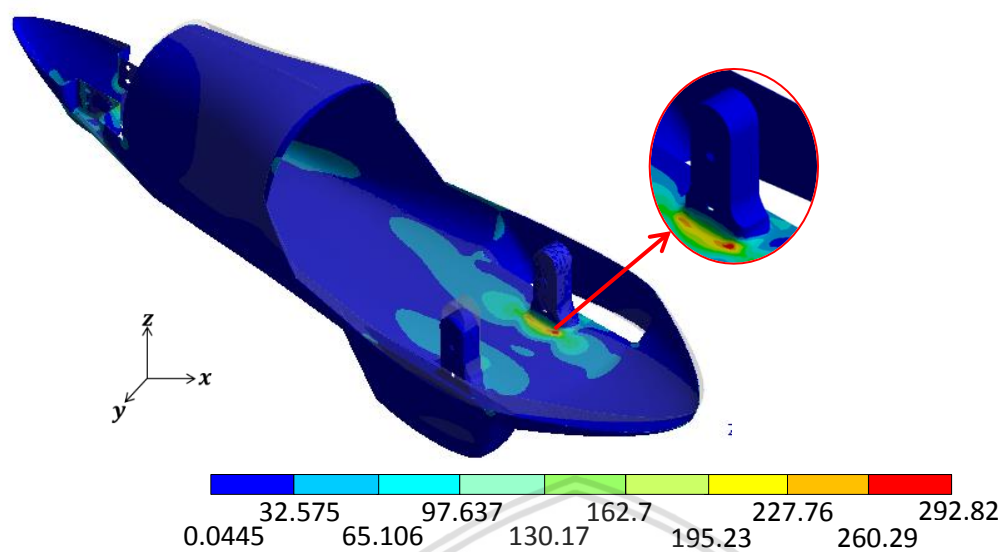
Nilai Tegangan Maksimum Seluruh Model Struktur *Monocoque Chassis* Pada Beberapa Titik

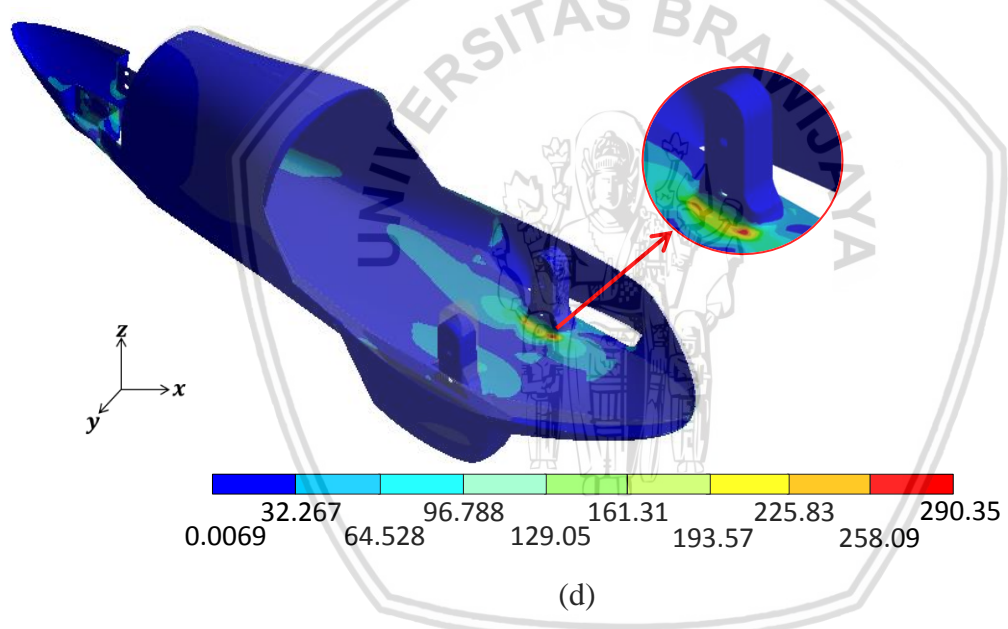
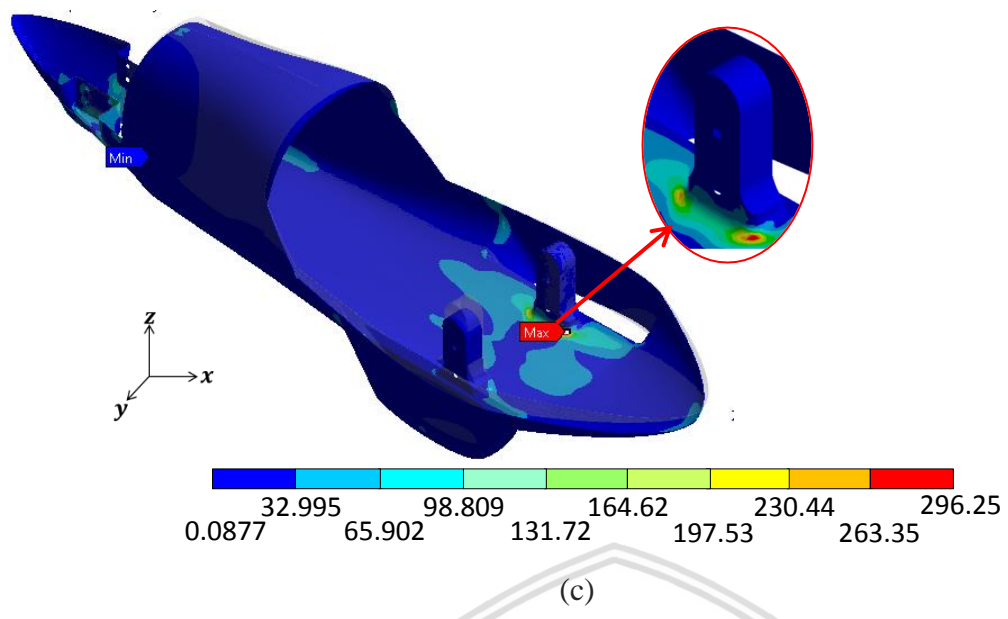
Model	Kode Sudut Orientasi	Nilai Tegangan Titik 1 (MPa)	Nilai Tegangan Titik 2 (MPa)	Nilai Tegangan Titik 3 (MPa)
1	[0/45/90] <sub>s</sub>	32.698	23.598	27.613
2	[0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> ]	29.842	22.648	27.298
3	[45/90/0] <sub>s</sub>	24.078	18.578	28.770
4	[45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> ]	32.939	23.217	30.010
5	[90/0/45] <sub>s</sub>	29.842	22.648	27.298
6	[90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> ]	33.221	17.528	29.364

Dapat dilihat pada Tabel 4.2 bahwa pada beberapa titik struktur *chassis* memiliki nilai tegangan yang berbeda. Pada titik 1 nilai tegangan terbesar yaitu 33.221 MPa pada model ke-enam dan nilai tegangan terkecil sebesar 24.078 MPa pada model ketiga. Pada titik 2 nilai tegangan terbesar yaitu 23.598 MPa pada model pertama dan nilai tegangan terkecil sebesar 17.528 MPa pada model ke-enam. Pada titik 3 nilai tegangan terbesar yaitu 30.010 MPa pada model ke-empat dan nilai tegangan terkecil sebesar 24.078 MPa pada model kedua dan ke-lima. Rata-rata nilai tegangan seluruh model pada titik 1 merupakan yang terbesar yaitu 30.44 MPa. Hal tersebut karena titik 1 merupakan pusat dari beban *driver* yang diberikan terhadap *chassis*.

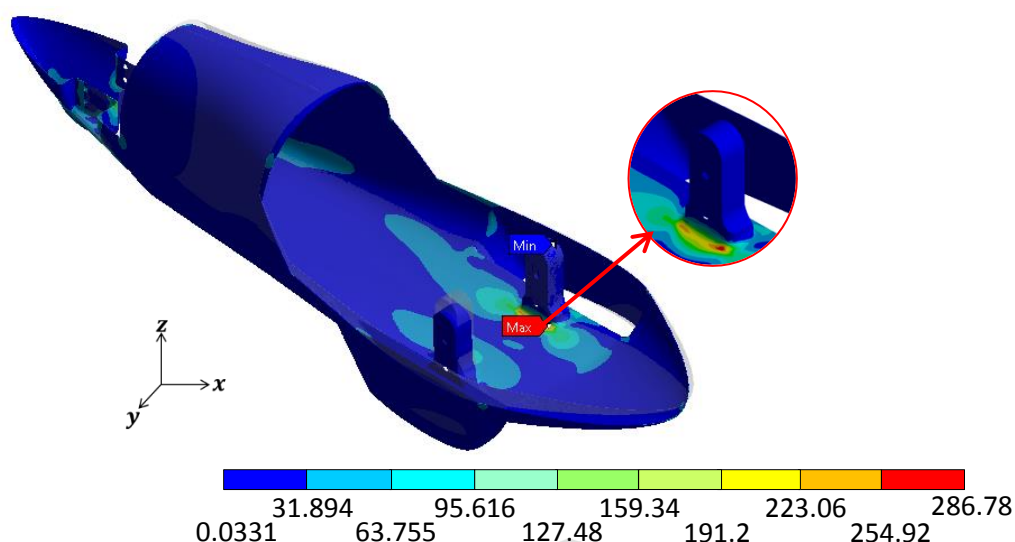
#### 4.1.2 Analisis Tegangan Akibat *Torsional Load*

Pengujian *torsional load* dilakukan untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada struktur *chassis* ketika mobil dalam keadaan statis dan berada pada kondisi permukaan yang tidak rata. Pengujian *torsional load* dilakukan dengan menghilangkan satu *fix support* yang ada pada pemodelan *chassis*. Beban yang diberikan pada *chassis* merupakan beban *driver* dan juga beban mesin. Distribusi tegangan pada ke-enam model hasil dari pengujian *torsional load* dapat dilihat seperti pada Gambar 4.4. Daerah berwarna merah merupakan nilai tegangan maksimum yang terjadi pada struktur *chassis*. Sedangkan daerah berwarna biru merupakan daerah dimana tegangan minimum pada struktur *chassis* terjadi.

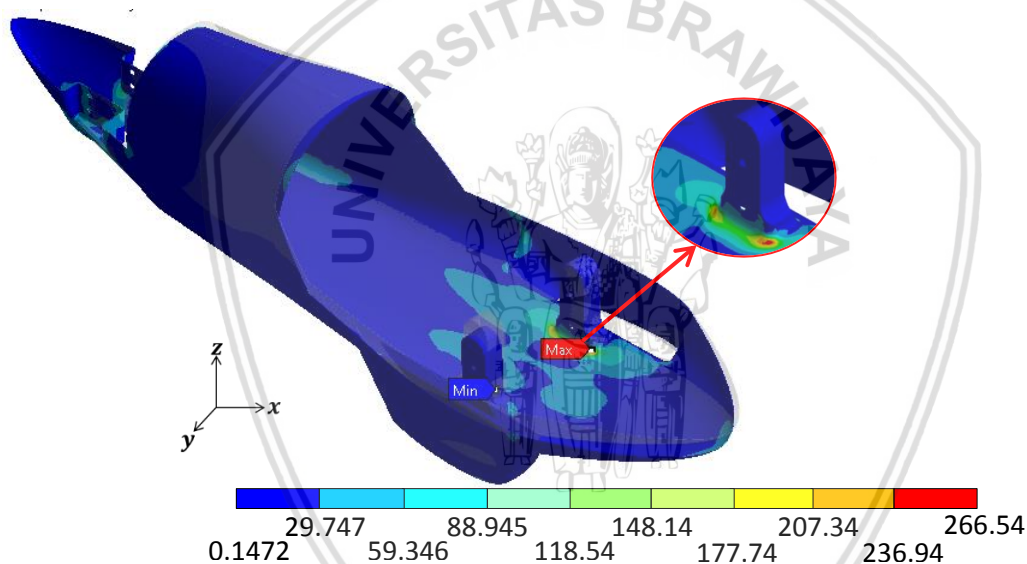








(e)



(f)

Gambar 4.4 Distribusi tegangan *torsional load* struktur chassis (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3 (d) model 4 (e) model 5 (f) model 6 (MPa)

Nilai tegangan maksimum dari enam model struktur *chassis* dapat dilihat pada Tabel 4.3. Dapat dilihat bahwa dari ke-enam model tersebut bahwa tegangan yang terjadi pada *chassis* pada umumnya bernilai minimum dimana daerah yang berwarna biru hampir menyelimuti seluruh struktur *chassis*. Daerah tegangan maksimum yang berwarna merah pada *chassis* di semua model terletak di bagian sudut yang terjadi penyempitan luas penampang.

Tabel 4.3

Nilai Tegangan Maksimum Seluruh Model Struktur *Monocoque Chassis* Akibat *Torsional load*

Model	Kode Sudut Orientasi	Nilai Tegangan Maksimum (MPa)
1	[0/45/90] <sub>s</sub>	292.821
2	[0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> ]	286.782
3	[45/90/0] <sub>s</sub>	296.253
4	[45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> ]	290.350
5	[90/0/45] <sub>s</sub>	286.782
6	[90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> ]	266.541

Pada Tabel 4.3 terlihat bahwa nilai tegangan maksimum tertinggi terdapat pada model ketiga yaitu sebesar 296.253 MPa. Nilai tegangan maksimum terendah terletak pada model ke-enam yaitu sebesar 266.541 MPa. Model ke-enam memiliki nilai tegangan maksimum yang tertendah dikarenakan sudut orientasi 90° pada *layer* pertama dan sudut orientasi 45° pada *layer* terakhir. Hal ini diakibatkan oleh arah beban yang tidak searah dengan arah orientasi dari *fiber* pada komposit *carbon fiber* itu sendiri. Model kedua dan ke-enam memiliki nilai tegangan maksimum yang sama dikarenakan penggunaan *carbon fiber* dengan jenis *woven* dimana tidak ada perbedaan antara 0° dan 90°. Nilai tegangan yang terjadi juga dapat ditinjau pada beberapa titik yang sama untuk setiap modelnya seperti pada Gambar 4.3 pada pengujian *vertical bending*.

Tabel 4.4

Nilai Tegangan Maksimum Seluruh Model Struktur *Monocoque Chassis* Pada Beberapa Titik Akibat *Torsional load*

Model	Kode Sudut Orientasi	Nilai Tegangan Titik 1 (MPa)	Nilai Tegangan Titik 2 (MPa)	Nilai Tegangan Titik 3 (MPa)
1	[0/45/90] <sub>s</sub>	24.808	22.402	7.906
2	[0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> ]	21.567	21.264	8.080
3	[45/90/0] <sub>s</sub>	31.087	19.606	9.786
4	[45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> ]	26.979	21.813	6.760
5	[90/0/45] <sub>s</sub>	21.567	21.264	8.080
6	[90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> ]	28.200	17.204	9.289

Dapat dilihat pada Tabel 4.4 bahwa pada beberapa titik struktur *chassis* memiliki nilai tegangan yang berbeda. Pada titik 1 nilai tegangan terbesar yaitu 31.087 MPa pada model ketiga dan nilai tegangan terkecil sebesar 21.567 MPa pada model kedua dan ke-lima. Pada titik 2 nilai tegangan terbesar yaitu 22.402 MPa pada model pertama dan nilai tegangan terkecil sebesar 17.204 MPa pada model ke-enam. Pada titik 3 nilai tegangan terbesar yaitu 9.786 MPa pada model ketiga dan nilai tegangan terkecil sebesar 6.760 MPa pada model keempat. Rata-rata nilai tegangan seluruh model pada titik 1 merupakan yang terbesar

yaitu 25.70 MPa. Hal tersebut karena titik 1 merupakan tempat dimana pusat dari beban *driver* yang diberikan terhadap *chassis*.

### 4.3 Analisis Deformasi Pada Chassis

Pada *laminated carbon fiber* sudut orientasi dapat mempengaruhi defleksi yang terjadi pada struktur *chassis*. Hal ini berhubungan dengan modulus elastisitas yang berbeda pada setiap sudut orientasi dari material komposit. Persamaan (4-8) menjelaskan hubungan dari sudut orientasi terhadap modulus elastisitas suatu material komposit.

$$E_X = \frac{1}{\frac{1}{E_1} \cos^4 \theta + \left[ -\frac{2v_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right] \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{E_2} \sin^4 \theta} \quad (4-8)$$

dimana:

$E_X$  = modulus elastisitas *laminated* komposit terhadap sumbu x

$\theta$  = sudut orientasi

$E_1$  = modulus elastisitas *carbon fiber*

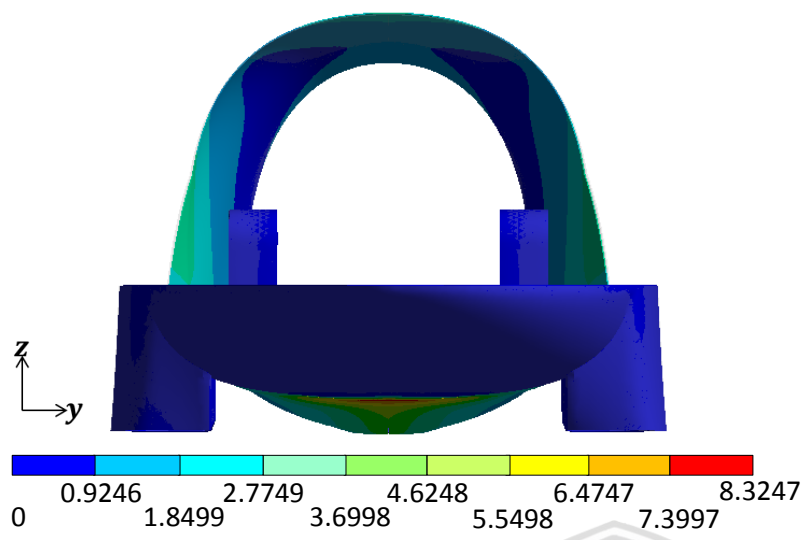
$v$  = *poisson ration*

$G$  = modulus geser *carbon fiber*

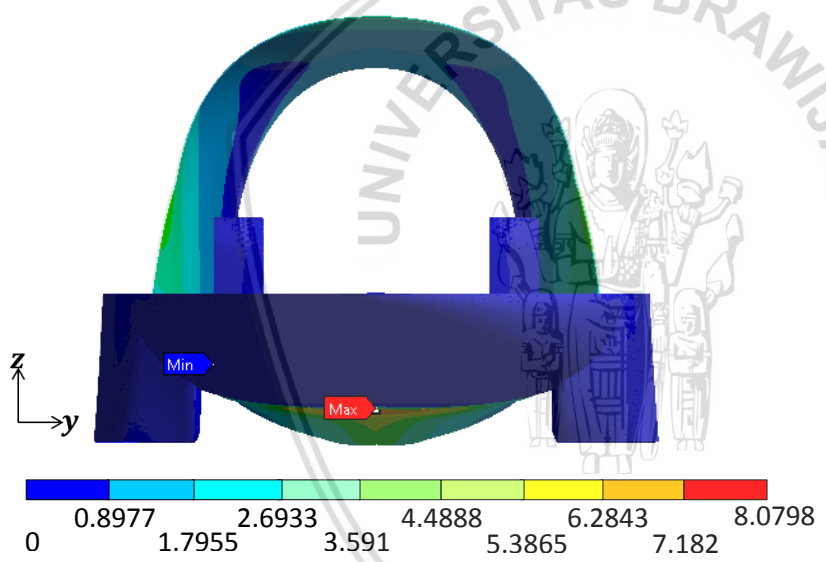
Nilai dari modulus elastisitas komposit *carbon fiber* akan mempengaruhi besarnya defleksi yang terjadi pada suatu struktur *chassis*.

#### 4.2.1 Analisis Deformasi Akibat *Vertical Bending*

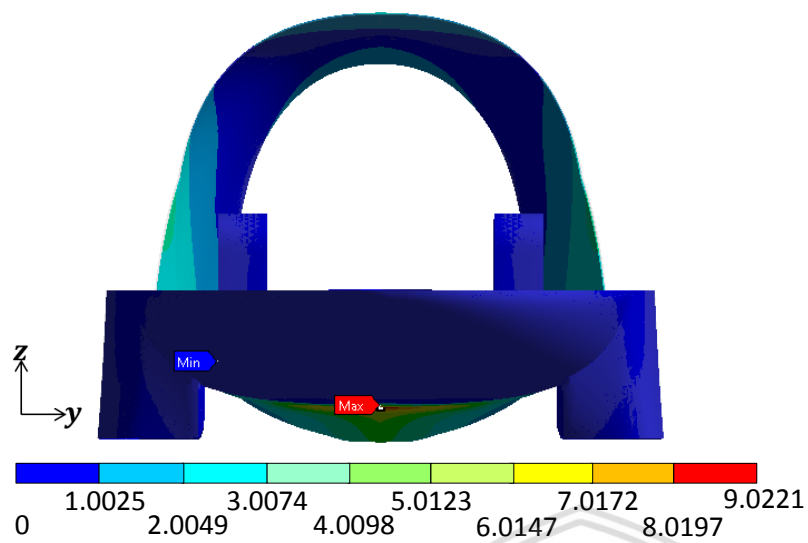
Pengujian *vertical bending* untuk mengetahui deformasi pada struktur *chassis* dilakukan dengan 6 jenis pemodelan. Beban yang diberikan pada *chassis* merupakan beban *driver* dan juga beban mesin. Deformasi yang terjadi pada ke-enam model hasil dari pengujian *vertical bending* dapat dilihat seperti pada Gambar 4.5. Daerah berwarna merah merupakan nilai deformasi maksimum yang terjadi pada struktur *chassis*. Sedangkan daerah berwarna biru merupakan daerah dimana deformasi yang terjadi pada struktur *chassis* bernilai minimum.



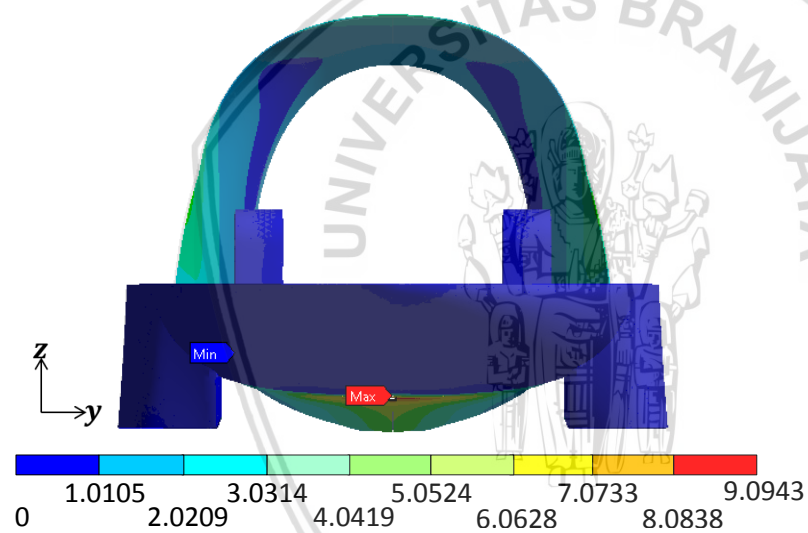
(a)



(b)

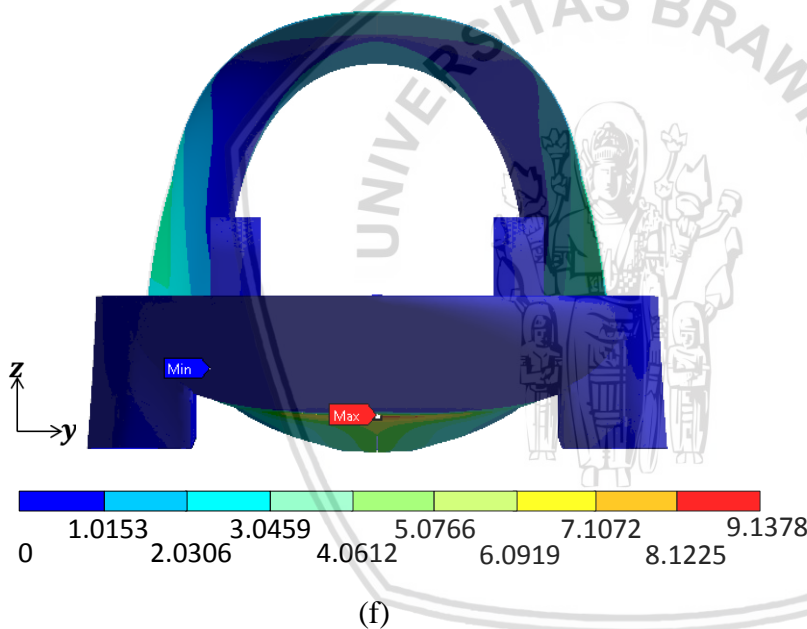
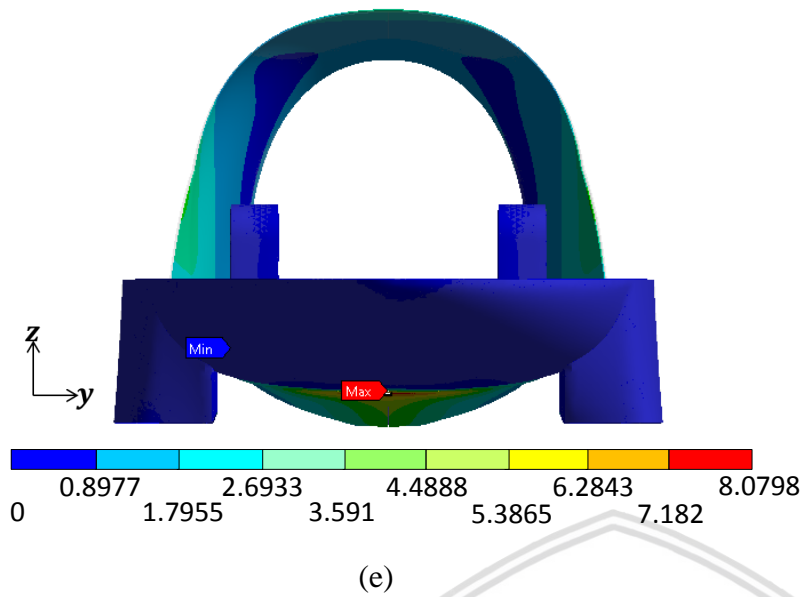


(c)



(d)





Gambar 4.5 Defromasi akibat *vertical bending* struktur chassis (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3 (d) model 4 (e) model 5 (f) model 6 (mm)

Nilai deformasi maksimum dari enam model struktur *chassis* dapat dilihat pada Tabel 4.5. Dapat dilihat bahwa dari ke-enam model tersebut bahwa deformasi yang terjadi pada *chassis* pada umumnya bernilai minimum dimana daerah yang berwarna biru hampir menyelimuti seluruh struktur *chassis*. Deformasi maksimum pada struktur *chassis* yang berwarna merah terjadi pada daerah pembebanan *driver*.

Tabel 4.5

Nilai Deformasi Maksimum Seluruh Model Struktur *Monocoque Chassis* Akibat *Vertical Bending*

Model	Kode Sudut Orientasi	Nilai Deformasi Maksimum (mm)
1	[0/45/90]s	8.32
2	[0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> ]	8.08
3	[45/90/0]s	9.02
4	[45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> ]	9.09
5	[90/0/45]s	8.07
6	[90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> ]	9.13

Pada Tabel 4.5 terlihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada model ke-enam yaitu sebesar 9.13 mm. Deformasi maksimum terendah terjadi pada model kelima dan kedua yaitu sebesar 8.07 mm. Model kedua dan kelima memiliki nilai deformasi maksimum yang tertendah dikarenakan sudut orientasi 90° dan 0° pada *layer* pertama. Hal ini diakibatkan oleh arah beban yang tidak searah dengan arah orientasi dari *fiber* pada komposit *carbon fiber* itu sendiri. Model kedua dan kelima memiliki nilai tegangan maksimum yang sama dikarenakan penggunaan *carbon fiber* dengan jenis *woven* dimana tidak ada perbedaan antara 0° dan 90°. Nilai deformasi yang terjadi juga dapat ditinjau pada beberapa titik yang sama untuk setiap modelnya pada daerah yang sama seperti analisis tegangan yaitu pada Gambar 4.3 pada pengujian *vertical bending*.

Tabel 4.6

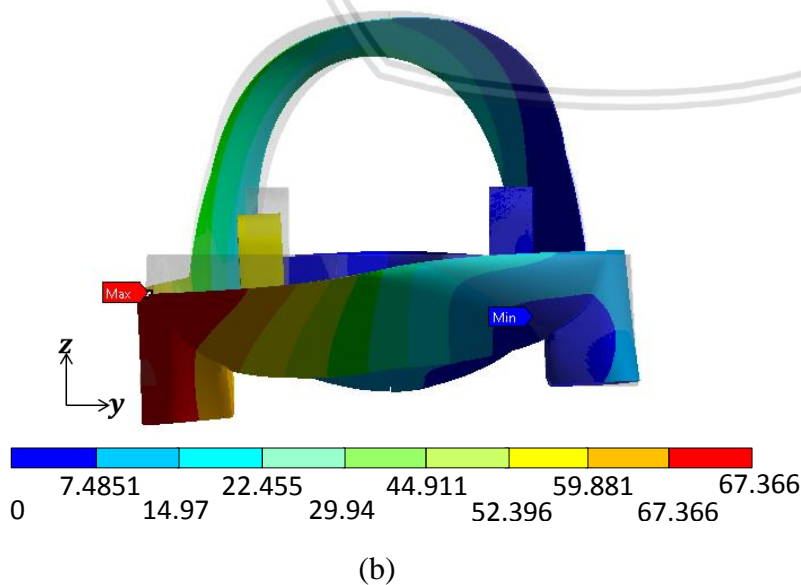
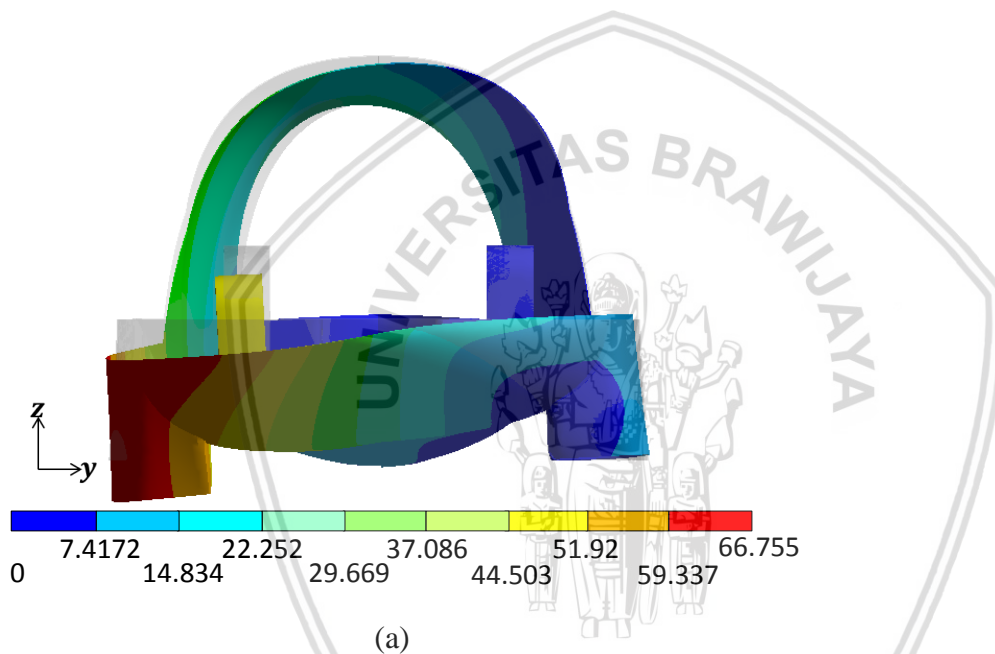
Nilai Deformasi Maksimum Seluruh Model Struktur *Monocoque Chassis* Pada Beberapa Titik Akibat *Vertical Bending*

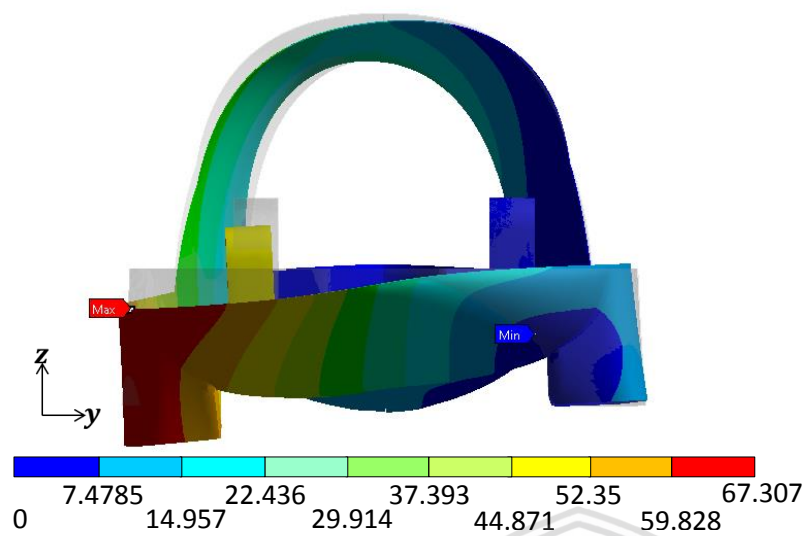
Model	Kode Sudut Orientasi	Nilai Deformasi Titik 1 (mm)	Nilai Deformasi Titik 2 (mm)	Nilai Deformasi Titik 3 (mm)
1	[0/45/90]s	6.39	6.935	0.355
2	[0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> ]	6.075	6.79	0.345
3	[45/90/0]s	7.21	7.38	0.385
4	[45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> ]	6.98	7.592	0.39
5	[90/0/45]s	6.075	6.79	0.345
6	[90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> ]	7.29	7.594	0.401

Dapat dilihat pada Tabel 4.6 bahwa pada beberapa titik struktur *chassis* memiliki nilai deformasi yang berbeda. Pada titik 1 nilai deformasi terbesar yaitu 7.29 mm pada model ke-enam dan nilai deformasi terkecil sebesar 6.075 mm pada model kedua dan ke-lima. Pada titik 2 nilai deformasi terbesar yaitu 7.594 mm pada model ke-enam dan nilai deformasi terkecil sebesar 6.79 mm pada model kedua dan kelima. Pada titik 3 nilai deformasi terbesar yaitu 0.401 mm pada model ke-enam dan nilai deformasi terkecil sebesar 0.345 mm pada model kedua dan kelima.

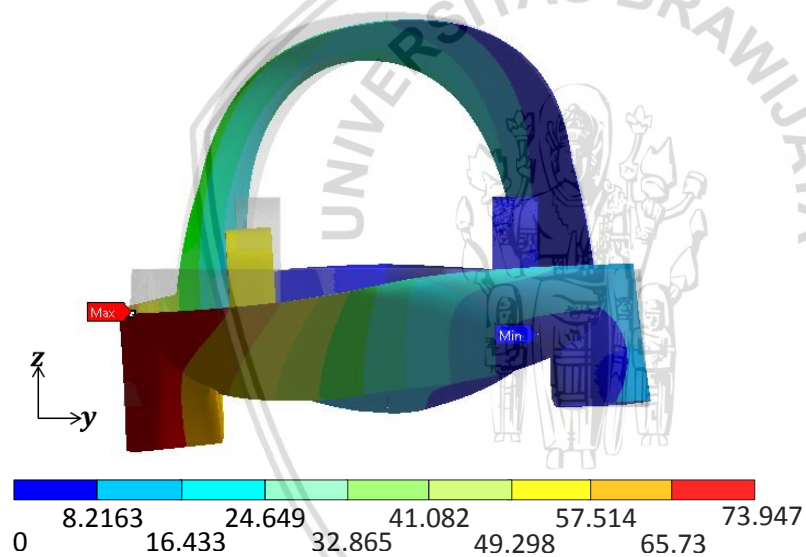
#### 4.2.2 Analisis Deformasi Akibat *Torsional load*

Pengujian *torsional load* untuk mengetahui deformasi pada struktur *chassis* pada saat kendaraan berada pada permukaan yang tidak rata. Pembebanan ini dilakukan dengan 6 jenis pemodelan dengan kombinasi sudut orientasi yang berbeda. Beban yang diberikan pada *chassis* merupakan beban *driver* dan juga beban mesin. Deformasi yang terjadi pada ke-enam model hasil dari pengujian *torsional load* dapat dilihat seperti pada Gambar 4.6. Daerah berwarna merah merupakan nilai deformasi maksimum yang terjadi pada struktur *chassis*. Sedangkan daerah berwarna biru merupakan daerah dimana deformasi yang terjadi pada struktur *chassis* bernilai minimum.

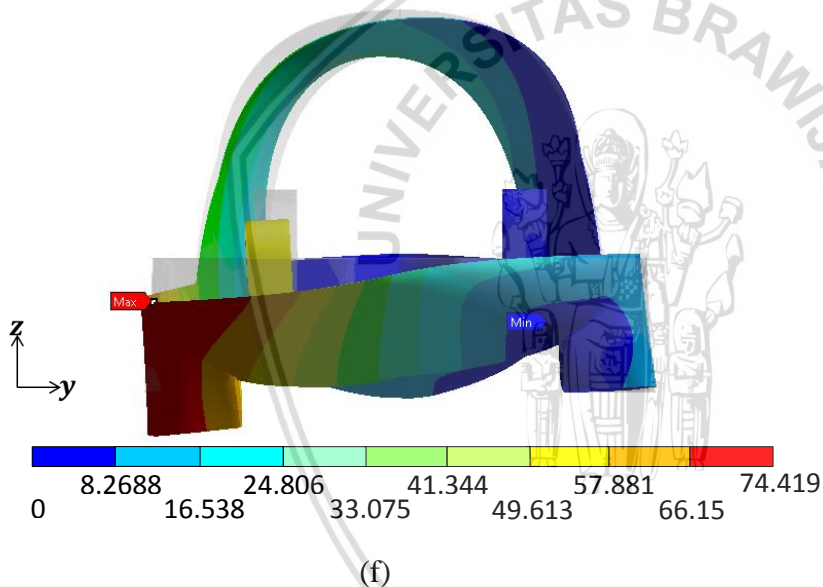
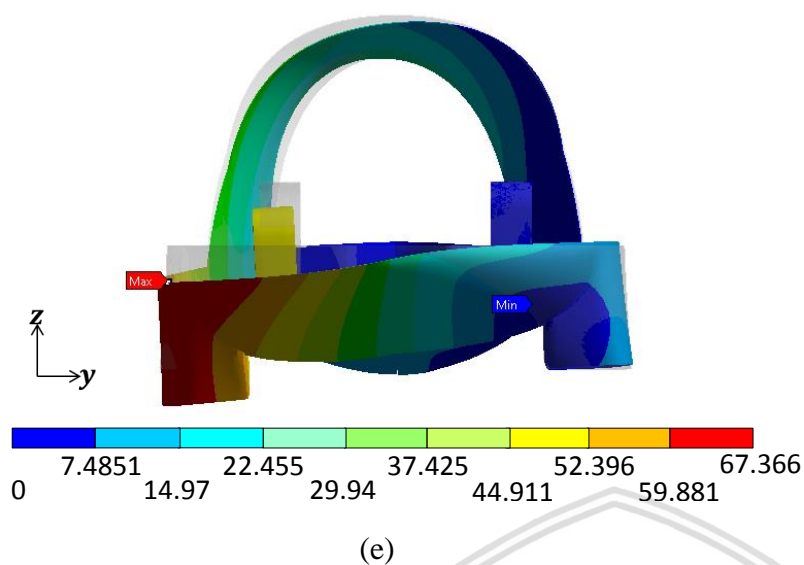




(c)



(d)



Gambar 4.6 Defromasi akibat *torsional load* struktur chassis (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3 (d) model 4 (e) model 5 (f) model 6 (mm)

Nilai deformasi maksimum dari enam model struktur *chassis* dapat dilihat pada Tabel 4.7. Dapat dilihat bawa dari ke-enam model tersebut bahwa deformasi yang terjadi pada *chassis* bernilai maksimum di bagian tumpuan roda satu sisi dan bernilai minimum di bagian tumpuan roda sisi lainnya.



Tabel 4.7

Nilai Deformasi Maksimum Seluruh Model Struktur *Monocoque Chassis* Akibat *Torsional Load*

Model	Kode Sudut Orientasi	Nilai Deformasi Maksimum (mm)
1	[0/45/90] <sub>s</sub>	66.75
2	[0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> ]	67.37
3	[45/90/0] <sub>s</sub>	67.31
4	[45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> ]	73.95
5	[90/0/45] <sub>s</sub>	67.37
6	[90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> ]	74.42

Pada Tabel 4.7 terlihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada model ke-enam yaitu sebesar 74.42 mm. Deformasi maksimum terendah terjadi pada model pertama yaitu sebesar 66.75 mm. Model pertama memiliki nilai deformasi maksimum yang tertendah dikarenakan sudut orientasi 0° pada *layer* pertama dan terakhir. Hal ini diakibatkan oleh arah beban yang tidak searah dengan arah orientasi dari *fiber* pada komposit *carbon fiber* itu sendiri. Model kedua dan kelima memiliki nilai tegangan maksimum yang sama dikarenakan penggunaan *carbon fiber* dengan jenis *woven* dimana tidak ada perbedaan antara 0° dan 90°. Nilai deformasi yang terjadi juga dapat ditinjau pada beberapa titik yang sama untuk setiap modelnya pada daerah yang sama seperti analisis tegangan yaitu pada Gambar 4.3 pada pengujian *vertical bending*.

Tabel 4.8

Nilai Deformasi Maksimum Seluruh Model Struktur *Monocoque Chassis* Pada Beberapa Titik Akibat *Torsional Load*

Model	Kode Sudut Orientasi	Nilai Deformasi Titik 1 (mm)	Nilai Deformasi Titik 2 (mm)	Nilai Deformasi Titik 3 (mm)
1	[0/45/90] <sub>s</sub>	23.949	16.258	43.578
2	[0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> ]	23.598	16.137	43.735
3	[45/90/0] <sub>s</sub>	25.228	16.868	44.300
4	[45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> ]	26.125	17.888	47.808
5	[90/0/45] <sub>s</sub>	23.598	16.137	43.735
6	[90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> ]	26.943	18.052	48.828

Dapat dilihat pada Tabel 4.8 bahwa pada beberapa titik *chassis* memiliki nilai deformasi yang berbeda dengan titik lainnya. Pada titik 1 nilai deformasi terbesar yaitu 26.943 mm pada model ke-enam dan nilai deformasi terkecil sebesar 23.598 mm pada model kedua dan ke-lima. Pada titik 2 nilai deformasi terbesar yaitu 18.052 mm pada model ke-enam dan nilai deformasi terkecil sebesar 16.137 pada model kedua dan kelima. Pada titik 3 nilai deformasi terbesar yaitu 48.828 mm pada model ke-enam dan nilai deformasi terkecil sebesar 43.578 mm pada model pertama

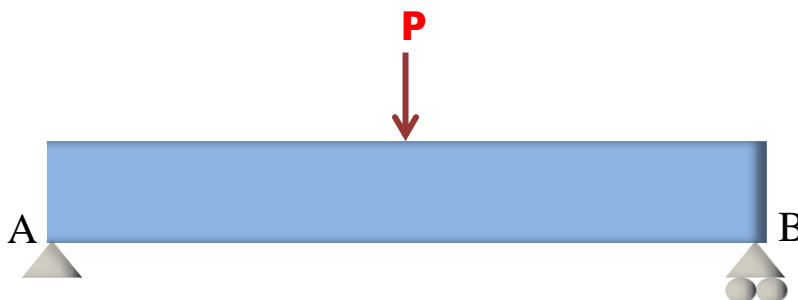
#### 4.4 Pembahasan Tegangan dan Deformasi pada Chassis

Struktur *chassis* pada saat pembebanan *torsional load* dapat digambarkan seperti *cantilever beam* seperti pada Gambar 4.7. Dapat dilihat pada pengujian *torsional load* daerah yang mengalami tegangan terbesar terletak pada bagian yang mengalami perubahan geometri. Dimana tegangan yang lebih besar akan terjadi apabila struktur mengalami perubahan geometri (Beer, 2015, p.263). Deformasi terbesar pada pengujian *torsional load* terletak pada bagian dimana *chassis* tidak ditumpu. Hal tersebut karena tidak adanya tumpuan yang memberikan reaksi gaya untuk menahan beban yang diberikan pada *chassis*.



Gambar 4.7 Cantilever beam

Struktur *chassis* pada saat pembebanan *vertical bending* dapat digambarkan seperti *simply supported beam* seperti pada Gambar 4.8. Dapat dilihat pada pengujian *vertical bending* daerah yang mengalami tegangan terbesar terletak pada bagian yang diberi tumpuan. Dimana hal ini diakibatkan tumpuan memberikan gaya yang berlawanan arah akibat dari pembebanan. Deformasi terbesar pada pengujian *vertical bending* terletak pada bagian tengah tempat beban diberikan. Hal ini dikarenakan momen yang terjadi bernilai maksimal diantara tumpuan.



Gambar 4.8 Simply supported beam

#### 4.5 Komparasi Seluruh Model

Analisis hasil perbandingan atau komparasi dari seluruh model dilakukan dengan tujuan menentukan kombinasi terbaik dari variasi sudut orientasi *laminat carbon fiber* pada struktur *monocoque chassis*. Semua nilai tegangan dan deformasi maksimum yang terjadi pada struktur *monocoque chassis* dari seluruh model dapat dilihat pada Tabel 4.9. Nilai yang tertera pada Tabel 4.9 yaitu nilai tegangan dan deformasi dari *vertical bending* dan *torsional load*.

Tabel 4.9

Nilai Deformasi dan Tegangan Maksimum Seluruh Model Struktur *Monocoque Chassis*

Model	Kode Sudut Orientasi	<i>Vertical Bending</i>		<i>Torsional load</i>	
		Tegangan (MPa)	Deformasi (mm)	Tegangan (MPa)	Deformasi (mm)
1	[0/45/90] <sub>s</sub>	85.588	8.325	292.821	66.755
2	<b>[0<sub>2</sub>/45<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>]</b>	<b>82.257</b>	<b>8.080</b>	<b>286.782</b>	<b>67.366</b>
3	[45/90/0] <sub>s</sub>	114.109	9.022	296.253	67.307
4	[45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> ]	94.498	9.094	290.350	73.947
5	<b>[90/0/45]<sub>s</sub></b>	<b>82.257</b>	<b>8.080</b>	<b>286.782</b>	<b>67.366</b>
6	[90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> ]	100.899	9.138	266.541	74.419

Dilihat dari Tabel 4.9 pada pengujian *vertical bending* tegangan maksimum terendah terdapat pada model kedua dan kelima. Sedangkan tegangan maksimum tertinggi terjadi pada model ketiga. Deformasi maksimum tertinggi pada pengujian *vertical bending* terjadi pada model ke-enam dan deformasi maksimum terendah terdapat pada model kedua dan kelima.

Pada pengujian *torsional load* tegangan maksimum terendah terdapat pada model ke-enam. Jika dilihat dari hasil pada pengujian *vertical bending* model ke-enam memiliki nilai tegangan dan deformasi maksimum yang lebih tinggi dibandingkan dengan model kedua dan kelima. Sedangkan pada pengujian *torsional load* tegangan maksimum tertinggi terjadi pada model ketiga. Deformasi maksimum tertinggi pada pengujian *torsional load* terjadi pada model ke-enam dan deformasi maksimum terendah terdapat pada model pertama.

Tabel 4.10  
Inverse reserve factor (IRF) pada Seluruh Model

Model	Inverse Reserve Factor	
	Vertical Bending	Torsional Load
1	0.22	0.67
2	0.21	0.67
3	0.23	0.66
4	0.23	0.73
5	0.21	0.67
6	0.24	0.67

Pada Tabel 4.10 merupakan nilai *Inverse Reserve Factor* (IRF) pada pembebanan *torsional load* dan *vertical bending*. Nilai IRF didapat dari Persamaan (4-10).

$$RF = \frac{\sigma_f}{\sigma_{applied}}$$

$$IRF = \frac{1}{RF} \quad (4-10)$$

dimana :

RF = *reserve factor*

IRF = *inverse reserve factor*

$\sigma_f$  = tegangan maksimal material

$\sigma_{applied}$  = tegangan yang diberikan

Dapat dilihat bahwa nilai IRF dari pembebanan *vertical bending* dan *longitudinal torsion* semua model bernilai dibawah 1. Dari hal tersebut dapat dikatakan bahwa seluruh model struktur *chassis laminate carbon fiber* aman.

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian kali ini adalah:

1. Pada pengujian *vertical bending* nilai tegangan maksimum yang terjadi pada struktur *monocoque chassis* terbesar terdapat pada model ketiga dengan kode sudut orientasi  $[45/90/0]_s$  sebesar 114.109 MPa. Sedangkan nilai tegangan maksimum terendah yang terjadi pada pengujian ini yaitu sebesar 82.257 MPa pada model kedua dan kelima dengan kode sudut orientasi  $[0_2/45_2/90_2]$  dan  $[90/0/45]_s$  secara berturut-turut. Pada pengujian *torsional load* nilai tegangan maksimum yang terjadi pada struktur *monocoque chassis* terbesar terdapat pada model ketiga dengan kode sudut orientasi  $[45/90/0]_s$  sebesar 296.253 MPa. Sedangkan nilai tegangan maksimum terendah yang terjadi pada pengujian ini yaitu sebesar 266.541 MPa pada model ke-enam dengan kode sudut orientasi  $[90_2/0_2/45_2]$ .
2. Nilai deformasi maksimum pada pembebanan *vertical bending* terbesar terdapat pada model ke-enam dengan kode sudut orientasi  $[90_2/0_2/45_2]$  sebesar 9.138 mm. Sedangkan nilai deformasi maksimum terendah yang terjadi pada pengujian ini yaitu sebesar 8.080 mm pada model kedua dan kelima dengan kode sudut orientasi  $[0_2/45_2/90_2]$  dan  $[90/0/45]_s$  secara berturut-turut. Nilai deformasi maksimum yang terjadi pada pembebanan *torsional load* terbesar terdapat pada model ke-enam dengan kode sudut orientasi  $[90_2/0_2/45_2]$  sebesar 74.419 mm. Sedangkan nilai deformasi maksimum terendah yang terjadi pada pengujian ini yaitu sebesar 66.755 mm pada model pertama dengan kode sudut orientasi  $[0/45/90]_s$ .

### 5.2 Saran

1. Sebaiknya penelitian lebih lanjut mengenai sudut orientasi *carbon fiber* pada struktur *monocoque chassis* dilakukan dengan variasi sudut orientasi yang lebih banyak.
2. Sebaiknya dilakukan optimasi desain *monocoque chassis* dengan bahan komposit *laminat carbon fiber* dengan menggunakan hasil penelitian kali ini dengan tujuan untuk menghasilkan struktur *chassis* yang lebih kuat dan ringan.



3. Sebaiknya dilakukan penelitian mengenai sudut orientasi *laminat carbon fiber* pada struktur lain selain *chassis*.



## DAFTAR PUSTAKA

- Beer, F.P., Johnston Jr., E.R., John, T.D., Mazurek, D.F. (2015). *Mechanics Of Materials, Seventh Edition*. New York: McGraw-Hill Education.
- Callister, W. D. Jr. (2009). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Campbell, F. C. (2010). *Structural Composite Materials*. Ohio: ASM International.
- Dieter, G. E. Jr. (1961). *Mechanical Metallurgy*. New York: McGraw-Hill.
- Eurenius, C. A., Danielsson, N., Khokar, A., Krane, E., Olofsson, M., Wass, J. (2013). Analysis of Composite Chassis. *Bachelor Thesis. Unpublished*. Sweden: Chalmers University Of Technology.
- Folkson, R. (2014). *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Gibson, R.F. (2011). *Principles Of Composite Material Mechanics*. New York: McGraw-Hill.
- Jose, J.P., Malhotra, S.K., Thomas, S., Joseph, K., Goda, K., Sreekala, M.S. (2012). *Polymer Composites: Volume 1*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Lii, B. (2009). Design and Manufacture of a Composite Monocoque Chassis. *Bachelor Thesis. Unpublished*. Queensland: University of Queensland.
- Mathai, A., Kurian, A. P., Jacob, B., K, N. M., Baby, T.R. (2014). Ply Orientation of Carbon Fiber Reinforced Aircraft Wing - A Parametric Study. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. 4(5): 8353-55.
- More, A., Chavan, C., Patil, N., Ravi, K. (2017). Design, Analysis and Optimization of Space Frame Chassis. *Jurnal IJET*. 9(2): 1411-1422.
- Njuguna, J. (2016). *Lightweight Composite Structures in Transport*. Cambridge: Elsevier Ltd.
- Sutantra, I. N. & Sampurno, B. (2010). *Teknologi Otomotif Edisi Kedua*. Surabaya: Guna Widya.
- Wu, J., Badu, O. A., Tai, Y., George, A. R. (2014). Design, Analysis, and Simulation of an Automotive Carbon Fiber Monocoque Chassis. *Jurnal SAE Int*. 7(2): 838-861.
- Wakeham, K.J. (2009). Introduction to Chassis Design. *Bachelor Thesis. Unpublished*. Newfoundland And Labrador: Memorial University of Newfoundland And Labrador.